

JAERI-Data/Code  
97-046



高燃焼燃料解析コードEXBURN-Iの  
詳細構造とユーザーズマニュアル

1997年11月

鈴木元衛・齊藤裕明\*

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。  
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒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 Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1997

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 納原子力資料サービス

高燃焼燃料解析コード EXBURN-I の  
詳細構造とユーザーズマニュアル

日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター原子炉安全工学部  
鈴木 元衛・齊藤 裕明 \*

(1997年10月16日受理)

軽水炉燃料の高燃焼度領域における通常運転時および出力変動時のふるまいを解析するコード EXBURN-I を開発した。燃料の高燃焼領域でのふるまいには、中程度までの燃焼領域でのふるまいの延長からそれた、質的に異なった現象が現れる。EXBURN-I は、こうした現象を解析するため、中程度までの燃焼領域での燃料ふるまい解析コード FEMAXI-IV の基本構造に対して、ペレット熱伝導率変化、FP ガス放出率の燃焼履歴依存変化、被覆管酸化膜成長などの新たなモデルを組み入れたものである。本報告は、EXBURN-I コードの全体構造とモデル及び物性値の説明を詳細に行い、また、詳細な入力マニュアル、サンプル入出力などを添えたものである。

Detailed Description and User's Manual of  
High Burnup Fuel Analysis Code EXBURN-I

Motoe SUZUKI and Hiroaki SAITOU\*

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

(Received October 16, 1997)

EXBURN-I has been developed for the analysis of LWR high burnup fuel behavior in normal operation and power transient conditions. In the high burnup region, phenomena occur which are different in quality from those expected for the extension of behaviors in the mid-burnup region.

To analyze these phenomena, EXBURN-I has been formed by the incorporation of such new models as pellet thermal conductivity change, burnup-dependent FP gas release rate, and cladding oxide layer growth to the basic structure of low- and mid-burnup fuel analysis code FEMAXI-IV.

The present report describes in detail the whole structure of the code, models, and materials properties. Also, it includes a detailed input manual and sample output, etc.

Keywords: LWR, Fuel, FEM, Pellet, Cladding, High-burnup, FP Gas Release,  
Cladding Oxidation

## 目 次

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 1. 序 言 .....                      | 1   |
| 1.1 コードの概要 .....                  | 1   |
| 1.2 コードの基本構造 .....                | 2   |
| 1.3 数値計算とモデルの特徴 .....             | 5   |
| 2. 解析理論および機能 .....                | 7   |
| 2.1 热的ふるまい .....                  | 7   |
| 2.1.1 温度分布 .....                  | 8   |
| 2.1.2 ギャップ熱伝達 .....               | 29  |
| 2.1.3 接触力評価モデル .....              | 31  |
| 2.1.4 FPガス生成・放出 .....             | 45  |
| 2.1.5 ギャップ内ガスの拡散・流動モデル .....      | 68  |
| 2.1.6 タイムステップの更新 .....            | 79  |
| 2.2 燃料棒全長での力学的ふるまい .....          | 81  |
| 2.2.1 有限要素モデル .....               | 81  |
| 2.2.2 基 本 式 .....                 | 85  |
| 2.2.3 ペレットクラック .....              | 88  |
| 2.2.4 クリープ .....                  | 91  |
| 2.2.5 塑 性 .....                   | 95  |
| 2.2.6 剛性方程式の導出 .....              | 99  |
| 2.2.7 ペレット及び被覆管に作用する外力及び接触力 ..... | 101 |
| 2.2.8 境界条件 .....                  | 102 |
| 2.2.9 全体マトリクスの作成 .....            | 105 |
| 2.2.10 上下プレナム境界条件 .....           | 106 |
| 2.2.11 ペレットと被覆管の接触判定 .....        | 110 |
| 2.3 物 性 値 .....                   | 114 |
| 2.3.1 ペレット物性値 .....               | 114 |
| 2.3.2 ジルカロイ被覆管物性値 .....           | 131 |
| 2.3.3 その他の物性値 .....               | 139 |
| 参考文献 .....                        | 144 |
| 付 錄 .....                         | 148 |

## Contents

|                  |   |     |
|------------------|---|-----|
| 1.               | Introduction .....  | 1   |
| 1.1              | Outline of the Code .....   | 1   |
| 1.2              | Basic Structure of the Code.....  | 2   |
| 1.3              | Features of Numerical Method and Modeling .....                         | 5   |
| 2.               | Analytical Theory and Functions .....                                   | 7   |
| 2.1              | Thermal Behavior .....  | 7   |
| 2.1.1            | Temperature Distribution .....  | 8   |
| 2.1.2            | Gap Thermal Conduction .....  | 29  |
| 2.1.3            | Contact-force Estimation Model.....                                     | 31  |
| 2.1.4            | Generation and Release of FP Gas .....                                  | 45  |
| 2.1.5            | Gas Diffusion and Flow Model in the Gap .....                           | 68  |
| 2.1.6            | Renewal of Time Step .....  | 79  |
| 2.2              | Mechanical Behavior over Entire Length of Fuel Rod .....                | 81  |
| 2.2.1            | Finite Element Model .....  | 81  |
| 2.2.2            | Basic Equations .....   | 85  |
| 2.2.3            | Pellet Crack .....  | 88  |
| 2.2.4            | Creep .....   | 91  |
| 2.2.5            | Plasticity .....  | 95  |
| 2.2.6            | Derivation of Stiffness Equation.....                                   | 99  |
| 2.2.7            | External Force and Contact Force Acting on<br>Pellet and Cladding ..... | 101 |
| 2.2.8            | Boundary Conditions .....   | 102 |
| 2.2.9            | Creation of Total Matrix .....  | 105 |
| 2.2.10           | Boundary Conditions for Upper and Lower Plenums .....                   | 106 |
| 2.2.11           | Judgment of Contact between Pellet and Cladding .....                   | 110 |
| 2.3              | Material Properties .....   | 114 |
| 2.3.1            | Pellet Properties .....   | 114 |
| 2.3.2            | Zircaloy Cladding Properties .....                                      | 131 |
| 2.3.3            | Other Material Properties .....   | 139 |
| References ..... |   | 144 |
| Appendices ..... |   | 148 |

# 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、燃焼度の伸長が進められている。

このため、産業界では高燃焼度燃料の信頼性を向上させるために、燃料の改良が精力的に行われている。一方、高燃焼時の健全性を評価するため、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/t-U 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るので、独自にモデル化し、解析することが必要である。

こうした事情をふまえ、著者などが開発してきた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、すなわちモデルの追加、修正などを行い、高燃焼度領域の燃料の、通常運転時（事故条件は対象外）におけるふるまいを解析するコード EXBURN-I を開発した。

## 1.1 コードの概要

軽水炉燃料棒において、照射を受けることにより発生する熱的、力学的、化学的状態とそれらの相互作用は、出力レベルないしはその時間変化、出力履歴、および燃焼度に依存して変化する。低、中燃焼度領域においては、こうした変化とその相互作用を解析する燃料解析コードとして FEMAXI-III<sup>(1)</sup>、FEMAXI-IV<sup>(2)(9)</sup>、FEMAXI-IV(Ver.2)<sup>(10),(11)</sup>などがある。さらに、高燃焼燃料への対応を図ったコードとしては、他に ENIGMA<sup>(12)</sup>、TRANSURANUS<sup>(13)</sup>、EIMUS<sup>(14)</sup>などがある。

高燃焼度領域では燃焼度への依存性は強まり、ペレットの熱伝導率低下およびリム層形成<sup>(15)</sup>、被覆管の水側腐食の進行、発熱分布の変化などの、低中燃焼度では目立たなかつた問題が生じる。こうした高燃焼領域に固有の問題を解析するため、EXBURN-I は開発された。ただし、EXBURN-I の基本構造は FEMAXI-IV から受け継がれている。

EXBURN-I の解析対象は、1 本の燃料棒のペレット、被覆管、内部ガスなどの構成物において通常運転の出力履歴が与えられた場合に生じる熱的、力学的、化学的状態変化とそれらの相互作用である。通常運転には、負荷追従や出力急昇などの出力過渡が含まれる。したがって、解析範囲は、定常状態のみならず過渡状態にも及ぶが、事故条件は含まない。

EXBURN-I の基本構造は FEMAXI-IV をベースとしているが、新たに採用した機能及び主要な改良点は、次のとおりである。

1. ベレットの熱伝導率の、燃焼度依存低下モデルを組み込んだ。
2. 被覆管の水側腐食による酸化膜の成長モデルを付加し、酸化膜の熱伝達への影響を熱的解析に組み入れた。
3. ベレットリム領域からの FP ガスの追加放出モデル<sup>(15)</sup>を導入した。
4. 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<sup>(16)</sup>を追加した。
5. 燃料内出力分布計算コード RODBURN<sup>(17)</sup>の計算結果を取り入れた計算を可能とした。
6. ハルデン・データベース(TFDB)<sup>(18)</sup>のデータを入力データとすることを可能とした。

本コードが扱う現象を表 1.1 に示す。物性値は文献上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 UO<sub>2</sub> 燃料についても、それらの物性値を指定することにより計算が可能である。

表 1.1 EXBURN-I で解析される現象

|      | 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）<br>FP ガス放出（温度と燃焼度に依存）           | 熱膨張<br>弾性・塑性、クリープ<br>クラック<br>初期リロケーション<br>やきしまり<br>スウェーリング（固体 FP、ガスバブル）<br>ホットプレス |
| 被覆管  | 酸化膜成長<br>熱伝導                                    | 酸化膜成長<br>熱膨張<br>弾性・塑性、クリープ<br>軸方向照射成長   |
| 燃料棒  | ギャップ熱伝導<br>(混合ガス、接触、輻射)<br>被覆管表面熱伝達<br>ギャップガス流動 | ペレット・被覆管の力学的相互作用<br>摩擦  |

## 1.2 コードの基本構造

### (1) 全体構造

本コードは図 1.1 に概略を示すように、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 ガス放出モデル、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（セグメント）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る。

力学的解析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、スウェーリングおよび、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、応力やひずみを求める。ここでは塑性、クリープおよび割れたペレットの弾性が、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。ペレットと被覆管の非接触 $\leftrightarrow$ 接触、弹性 $\leftrightarrow$ 塑性の状態変化が 1 タイムステップ中に生じる場合には、タイムステップ終了時の計算結果を状態変化が起こった時刻に戻し、その時刻以後について状態を改めて再計算を行う。軸方向は最大 12 セグメントに分割して計算するので、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。

## (2) 热的解析と力学的解析の相互依存関係の近似

ここで、前述のように、熱的解析部は燃料棒の温度分布を求める目的とし、力学的解析部は変形及び応力分布を求める目的としている。両者から得られる温度と変形（応力）の間には当然相互作用があり、これを解析することは厳密には連成問題を解くことになる。

たとえば、ペレットの温度分布計算を収束させるためには、熱的解析部でのギャップコンダクタンスの計算の中に、ギャップ幅を計算する力学的解析部を導入する必要がある。このため、温度の収束計算のループの中へ力学的解析を導入することが必要である。したがって、その力学的解析部は多数回の計算を可能とするために短時間で計算できるモデルが望ましい。

一方、力学的解析の本来の目的である詳細な応力、ひずみ、変形解析は、短時間で実行することはほとんど不可能である。

この矛盾をさけるため、EXBURN-I の力学的解析部は、応力ひずみ計算を厳密に行って、変形及び応力評価に用いる詳細な力学的解析部 A と、熱的解析部の中でギャップ幅を求めるために温度と変形（応力）の関係を連成して解く簡易力学的解析部 B の、相互に独立した 2 つの部分からなる。（図 1.1 参照）

これら、2つの力学的解析部は、共通な物性値（経験式）を用いている。その解析結果は必ずしも一致してはいないが、全体的な傾向としては類似しており、温度、変形（応力）評価上問題となるほどの差異はないことが確認されている。

なお、簡易な力学的解析部Bについては 2.1.3 項の接触力モデルで、詳細な力学的解析部Aについては、2.2 節の力学的ふるまいで詳述する。

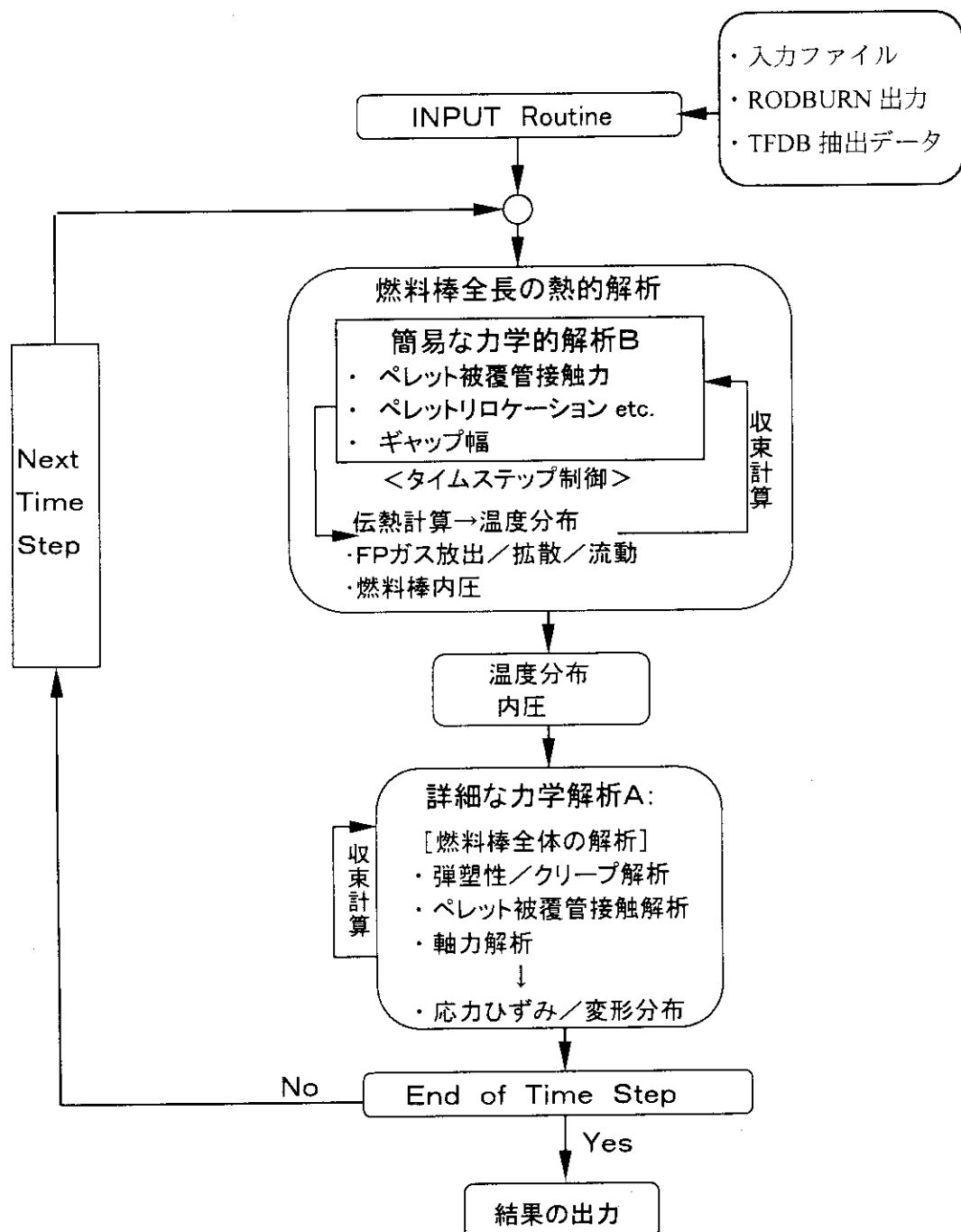


図1.1 EXBURN-I の全体構造

## 1. 3 数値計算とモデルの特徴

本コードの数値計算とモデルの主な特徴は以下のとおりである。ただし、(7)および(9)項以外は FEMAXI-IV からそのまま引き継いでいる。

### (1)要素特性

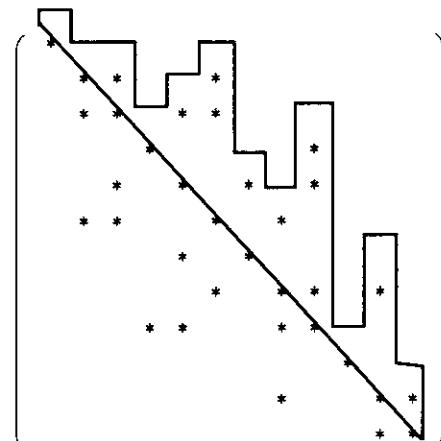
燃料全長にわたる力学計算を行うため、FEM 解析において四角形 3 自由度要素を導入し、計算領域、計算時間の短縮をはかっている。

### (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をはかっている。

### (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、計算時間を短縮している。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している。



\* : 非ゼロ成分    [] : スカイライン法の記憶領域

### (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)割れたペレットの挙動

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 ガス放出モデル

FP ガスの放出機構は、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である。さらに、ペレット内熱応力による FP ガス放出抑制モデルを組み込んだ。

(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の計算を行う。

(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 ガス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 ガス放出モデルでは、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。

## 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 热的ふるまい

熱的ふるまい部では、冷却材温度から決定される境界条件を用いて燃料棒内の温度分布を計算する。仮定および計算手順を以下に示す。これらの具体的な計算方法は 2.1.1 節で解説する。

- (1) 冷却材の温度と状態は、軸方向全セグメントにおいて、前タイムステップまでの冷却材履歴とは無関係に、現タイムステップでの入口温度、圧力、流量速度、各セグメントからの表面熱流束によって決定される。この関係は厳密には、燃料棒と冷却材が定常状態にあるときのみ成り立つが、EXBURN-I（および FEMAXI-IV）では、定常状態のみならず通常運転時の過渡変化、すなわち、出力上昇、下降、負荷追従などの変動時にも適用する。これらの過渡変化は実際には十分に緩やかであって、定常状態で近似できるからである。
- (2) 各軸方向セグメントにおける冷却材温度は、一つ下のセグメント L の冷却材温度および、セグメント L における発熱より求められる冷却材温度上昇の両者によって計算される。この計算は冷却材入口を起点とする。こうして、冷却材温度の軸方向分布が与えられる。
- (3) 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。
- (4) ペレット中心から被覆管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 次元体系で計算する。
- (5) 燃料棒の軸方向の伝熱は考慮しない。燃料棒においては、軸方向の出力分布差に起因する伝熱は、ペレット端面におけるディッシュや空隙の熱抵抗により抑制され、軸方向の温度勾配は半径方向に比べてきわめて小さく、z 方向の次元を計算式に追加して計算時間を大幅に拡大するだけの意義が乏しいからである。

また、径方向一次元温度分布の計算で必要なギャップ熱伝達モデル、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、および 2.1.4 節で解説する。

## 2.1.1 溫度分布

### (1) 燃料棒表面熱伝達モデル

#### (1)-1 基本的な仮定・方針

冷却材の軸方向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。計算は、単相流（サブクール水）および二相流（核沸騰状態）を対象とする。その際の仮定と方法は次のとおりである。

①冷却材のエンタルピー上昇に関しては、仮定の(1)のとおり、定常状態を仮定する。ただし、入口温度・流速等が全解析期間を通じて一定である必要はなく、時間依存の変数として入力が可能である。

②状態変数は、コード自身が備えている簡略化した蒸気表から内挿により求める。

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る。

$$h_{n+1} - h_n = \frac{2\pi r \overline{\phi}_n l_n}{GA} \quad (2.1.1)$$

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/m<sup>2</sup>·s)

$A$  : 流路断面積 (m<sup>2</sup>)

$\overline{\phi}_n$  : セグメント  $n$  の熱流束 (J/m<sup>2</sup>·s)

である。

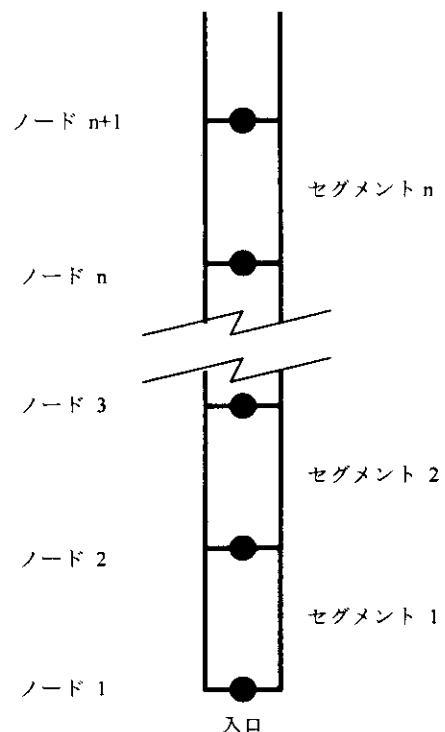


図 2.1 モデル形状

具体的な計算の順序を図 2.2 に示す。ここで、セグメント代表点エンタルピーとは、セグメントの上下のノードにおけるエンタルピーの平均エンタルピーである。

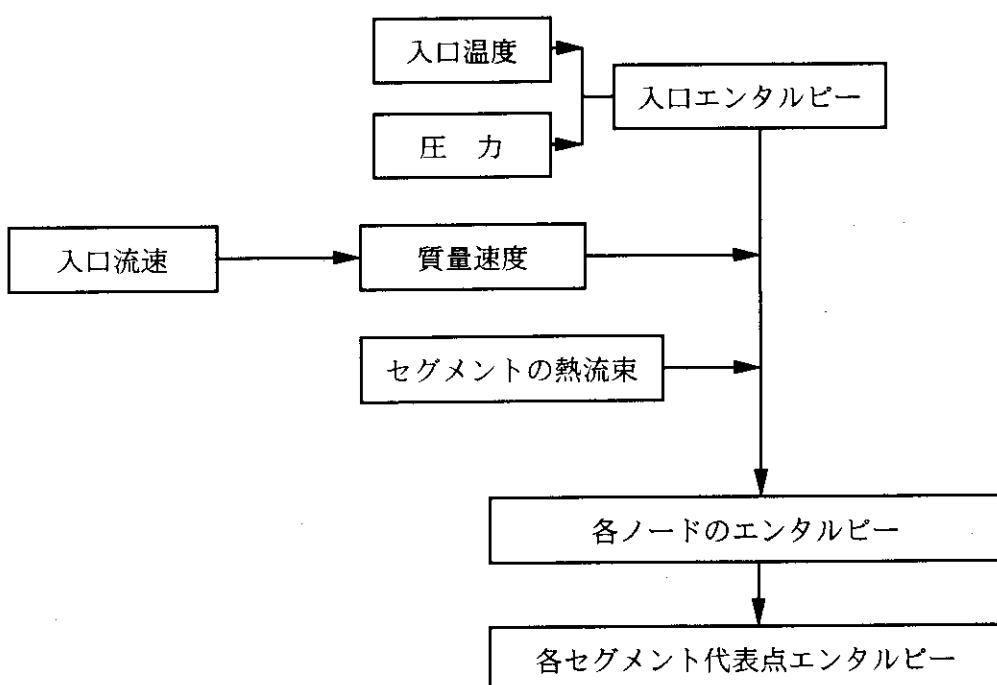


図 2.2 計算順序

## (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、熱伝導度およびプラントル数である。

EXBURN-I では、冷却材状態としてはサブクール水および、飽和水に近い 2 相領域（図 2.3 の斜線部分）を考える。

以下、温度を  $T$ 、圧力を  $P$ 、エンタルピーを  $h$  として計算方法を説明する。

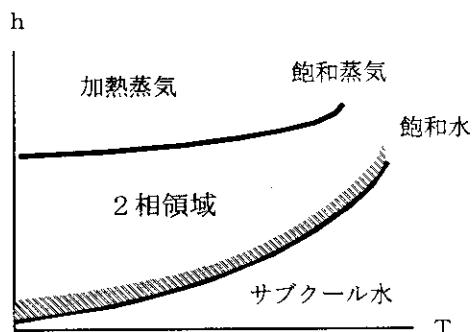


図 2.3 冷却材状態図

## [1] エンタルピー、温度

サブクール水のエンタルピーは、圧力依存性は弱いが、大きな圧力変化に対しては多少変化する。そこで、サブクール領域での  $h(P,T)$  の表では、30 気圧刻みの粗い圧力間隔でデータを準備し、以下のように内挿して用いる。

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

まず、飽和温度  $T_s$  を求める。 $T_s(P)$  線図を冷却材圧力に関して内挿して  $T_s$  を定め、水温  $T$  と比較する。なお、 $T_s(P)$  線図は 1bar～180bar の圧力範囲を持つ。

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°C、 $P$  で 30 気圧間隔) を用い、冷却材圧力より高い最初の定圧線データ  $h(P,T)$  を  $T$  について内挿して  $h$  を決める。（圧力については内挿しない）

b.  $T = T_s$  ( $T_s \pm 0.1^\circ\text{C}$  の許容幅内) の場合（2 相状態）

2 相状態であるが、水相における飽和水のエンタルピーを  $h = h_s$  とする。

c.  $T > T_s$  の場合（過熱蒸気）

過熱蒸気は、EXBURN-I の解析範囲外である。 $T > T_s + 0.1^\circ\text{C}$  となった場合には、プログラムは実行を停止する。

②  $P, h$  から  $T$  を求める計算（各セグメント代表点温度の計算）

(2.1.1)式を用いて各ノードのエンタルピーを求めた後、セグメント  $n$  の代表点エンタルピー  $h$  を、

$$h = \frac{1}{2}(h_n + h_{n+1})$$

1) 状態を求める

飽和水のエンタルピー  $h_f$  および飽和蒸気のエンタルピー  $h_g$  は  $h_f(P)$  線図を圧力に関して内挿して求める。なお、 $h_f(P)$  線図は、1bar～180bar の圧力範囲を持つ。

2)  $T$  を求めるa.  $h \leq h_f$  の場合

$h(P, T)$  表 ( $T$  で 20°C、 $P$  で 30 気圧間隔)において、 $P$  より高い最初の圧力  $P_1$  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)

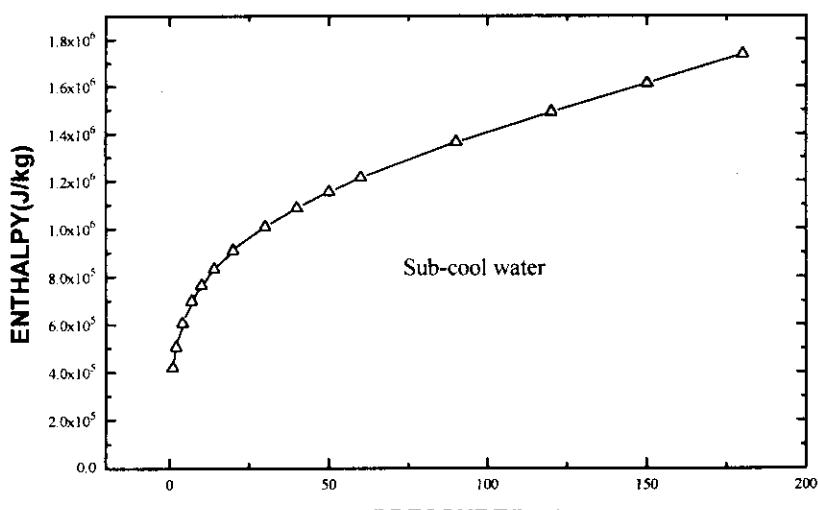
b.  $h_f < h < h_g$  の場合 (2 相領域)

水相温度を採用し、 $T = T_S$  とする。

## [2] その他の状態変数

水の密度、粘性係数、熱伝導度、およびプラントル数はサブクール状態の Dittus-Boelter 式<sup>(16)</sup>にのみ用いる。また、これらの量は圧力依存性があまり大きくない。したがって、飽和水に対する密度  $\rho_s(T)$ 、粘性係数  $\mu_s(T)$ 、熱伝導度  $k_s(T)$ 、プラントル数  $Pr_s(T)$  の表を用いて算出する。これらの表は、 $T$  について 10°C 間隔のテーブルである。

$h_f(T)$  線図、 $T_S(T)$  線図、 $h(P, T)$  線図、 $\rho$ 、 $\mu$ 、 $k$ 、及び  $Pr$  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  $h_f(p)$  線図

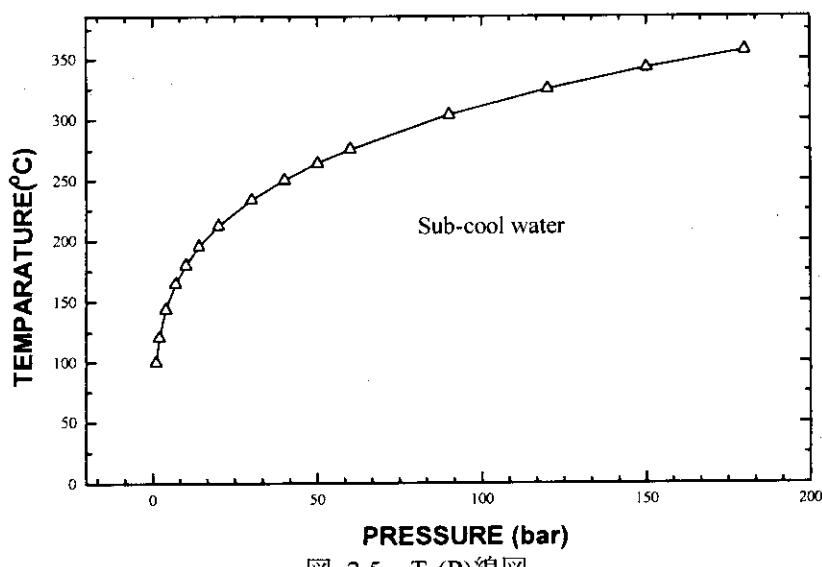


図 2.5  $T_s(P)$ 線図

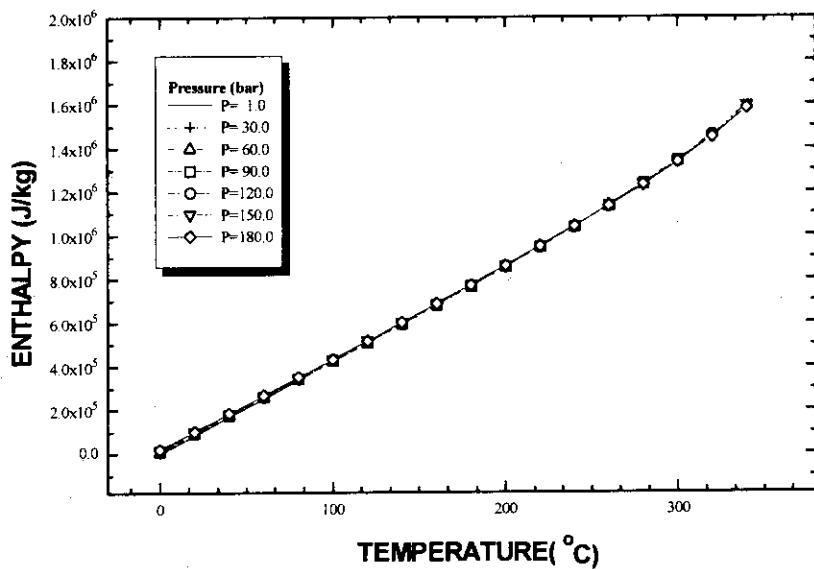


図 2.6  $h(P,T)$  線図

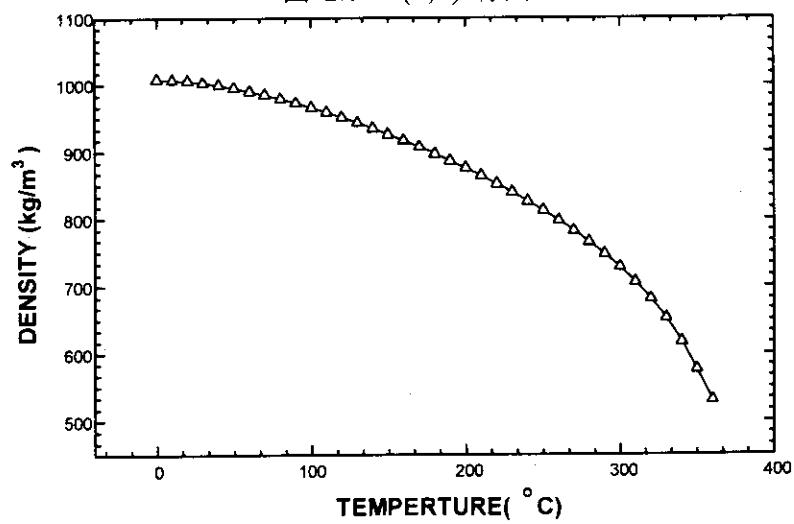


図 2.7 水の密度  $\rho$

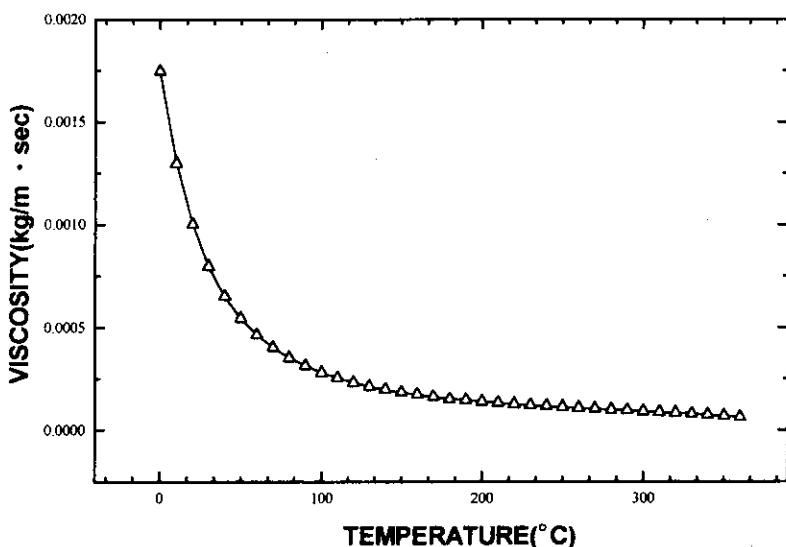


図 2.8 水の粘性係数  $\mu$

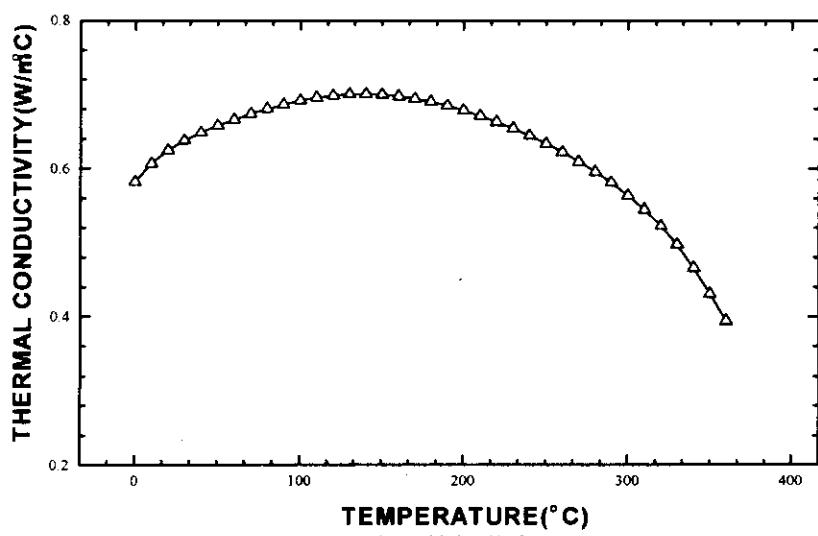


図 2.9 水の熱伝導度  $k$

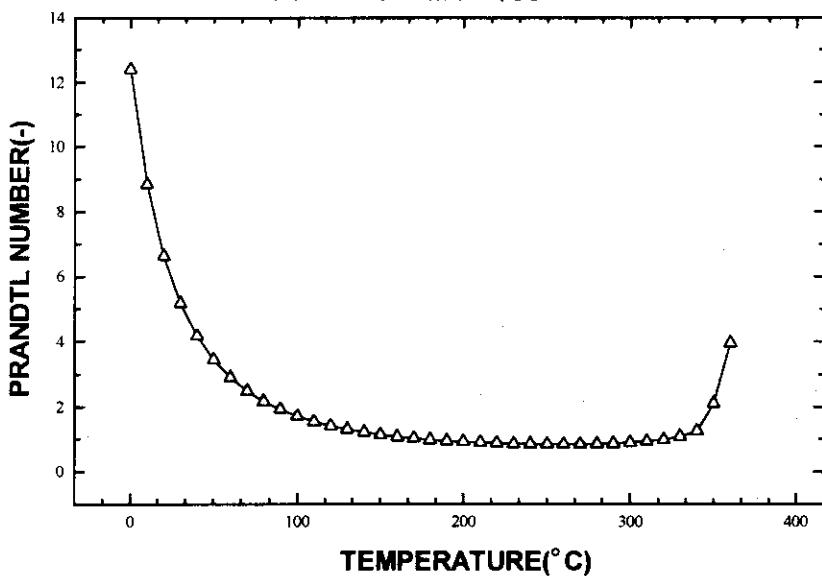


図 2.10 水のプラントル数  $Pr$

## (1) - 4 被覆管表面温度（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。 ((3)項参照)

$$\phi_N = A T_N + B \quad (2.1.2)$$

ここで、

$\phi_N$  : 被覆管表面熱流束 ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$T_N$  : 被覆管表面温度 (K)

$N$  : 被覆管表面メッシュ点番号

$A, B$  : 熱伝導差分式より求まる係数

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 式<sup>(19)</sup>および Jens-Lottes 式<sup>(20)</sup> ((1) - 5 項を参照) から表面温度  $T_N$  を求めることができる。以下に冷却材の状態ごとに  $T_N$  を求める方法を示す。

## [1] サブクール状態の場合（ただし被覆管表面温度が飽和温度に達しない場合）

この場合、(2.1.14)式に示す Dittus-Boelter 式を用いる。冷却材温度を  $T_B$  とすると、被覆管熱流束はこの式を用いて、

$$\phi_N = h_w (T_N - T_B) \quad (2.1.3)$$

となる。ここで、

$\phi_N$  : 被覆管表面熱流束 ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$h_w$  : Dittus-Boelter 式による熱伝達係数 ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )

$T_N$  : 被覆管表面温度 (K)

$T_B$  : 冷却材温度 (K)

である。(2.1.2)、(2.1.3)式より  $\phi_N$  を消去することにより  $T_N$  が得られる。

## [2] サブクール状態の場合（ただし被覆管表面温度が飽和温度以上の場合）

この場合にはサブクール水における熱伝達式と 2 相状態における熱伝達式を連立して  $T_N$  を求める。被覆管表面熱流束  $\phi_N$  は、サブクール状態における熱伝達に関する熱流束  $\phi_{N1}$  と 2 相状態における熱伝達に関する熱流束  $\phi_{N2}$  の和として

$$\phi_N = \phi_{N1} + \phi_{N2} \quad (2.1.4)$$

と与えられる。

サブクール状態における熱伝達に関する熱流束  $\phi_N$  は、(2.1.14)式に示す Dittus-Boelter 式による熱伝達係数  $h_{w1}$  を用いて、

$$\phi_{N1} = h_{w1} (T_N - T_B) \quad (2.1.5)$$

と書ける。

同様に 2 相状態における熱伝達に関する熱流束  $\phi_{N2}$  についても、(2.1.15)式に示す Jens-Lottes 式を用いて表す。ところが(2.1.14)式では、熱伝達係数  $h_{w2}$  が  $\phi_{N2}$  の関数として与えられている。そこで  $\phi_{N2}$  を明示するため(2.1.14)式を  $h_{w2} = \alpha^* \phi_{N2}^{3/4}$  と略記すれば  $\phi_{N2}$  は

$$\begin{aligned} \phi_{N2} &= h_{w2}(T_N - T_S) \\ &= \alpha^* \phi_{N2}^{3/4} (T_N - T_S) \end{aligned} \quad (2.1.6)$$

の様に書ける。この式を  $\phi$  について解けば

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

より、

$$\phi_{N2} = \alpha (T_N - T_S)^4, \quad \alpha = \alpha^{*4} \quad (2.1.7)$$

を得る。(2.1.5)、(2.1.6)式を(2.1.4)式に代入すれば  $T_N$  についての方程式

$$A T_N + B = h_{w1} (T_N - T_B) + \alpha (T_N - T_S)^4 \quad (2.1.8)$$

が得られる。

EXBURN-I コード内では、(2.1.8)式を Newton 法を用いて解くために以下のように変形して用いている。(2.1.8)式を

$$(A - h_{w1}) T_N + B + h_{w1} T_B = \alpha (T_N - T_S)^4$$

とする。ここで、 $\tilde{T} = T_N - T_S$  とおけば、 $T_N = \tilde{T} + T_S$  より

$$\begin{aligned} (A - h_{w1})(\tilde{T} + T_S) + B + h_{w1} T_B &= \alpha \tilde{T}^4 \\ (A - h_{w1})\tilde{T} + (A - h_{w1})T_S + B + h_{w1} T_B &= \alpha \tilde{T}^4 \end{aligned} \quad (2.1.9)$$

となる。さらに

$$a = (A - h_{w1})/\alpha, \quad b = \{(A - h_{w1})T_S + B + h_{w1}T_B\}/\alpha \quad (2.1.10)$$

とおいて整理すれば、 $\tilde{T}$ についての方程式

$$a\tilde{T} + b = \tilde{T}^4 \quad (2.1.11)$$

を得る。この方程式を Newton 法により解いて  $\tilde{T}$  を求め、

$$T_N = \tilde{T} + T_S \quad (2.1.12)$$

に代入することにより、 $T_N$  を求めることができる。

### [ 3 ] 2相状態の場合

この場合は、Jens-Lottes 式を用いる。2相状態の場合、冷却材温度は飽和温度であることから、(2.1.15)式の熱伝達係数  $h_w$  を用いて、

$$\phi_N = h_w (T_N - T_s) \quad (2.1.13)$$

と書ける。ここで、

$\phi_N$  : 被覆管表面熱流束 (W/m<sup>2</sup>)

$h_w$  : Jens-Lottes 式による熱伝達係数 (W/m<sup>2</sup>·K)

$T_N$  : 被覆管表面温度 (K)

$T_s$  : 飽和温度 (K)

である。(2.1.2)、(2.1.13)式より  $\phi_N$  を消去して  $T_N$  が得られる。

#### ( 1 ) - 5 被覆管表面熱伝達係数

##### Dittus-Boelter の式 <sup>(19)</sup>

$$h_w = 0.023 \frac{k}{D_e} \left( \frac{D_e V \rho}{\mu} \right)^{0.2} Pr^{0.4} \quad (2.1.14)$$

$h_w$  : 表面熱伝達係数 (W/m<sup>2</sup>·K)

$k$  : 冷却水熱伝導度 (W/m·K)

$D_e$  : 相当直径 (m)

$V$  : 冷却水速度 (m/s)

$\rho$  : 冷却水密度 (kg/m<sup>3</sup>)

$\mu$  : 冷却水の粘度 (kg/m·s)

$Pr$  : プラントル数

Jens-Lottes の実験式<sup>(20)</sup>

$$h_w = 0.1263 \cdot \exp\left(\frac{P_w}{6.201 \times 10^6}\right) \phi_s^{0.75} \quad (2.1.15)$$

$h_w$  : 表面熱伝達係数 (W/cm<sup>2</sup>·K)

$P_w$  : 冷却水圧力 (N/m<sup>2</sup>)

$\phi_s$  : 被覆管外面熱流束 (W/cm<sup>2</sup>)

また、相当直径とは、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。

調整パラメータ AKFAC

被覆管表面熱伝達係数を次式で調整する。

$$h_w = h_w \times AKFAC$$

## (1)-6 プログラムの流れ

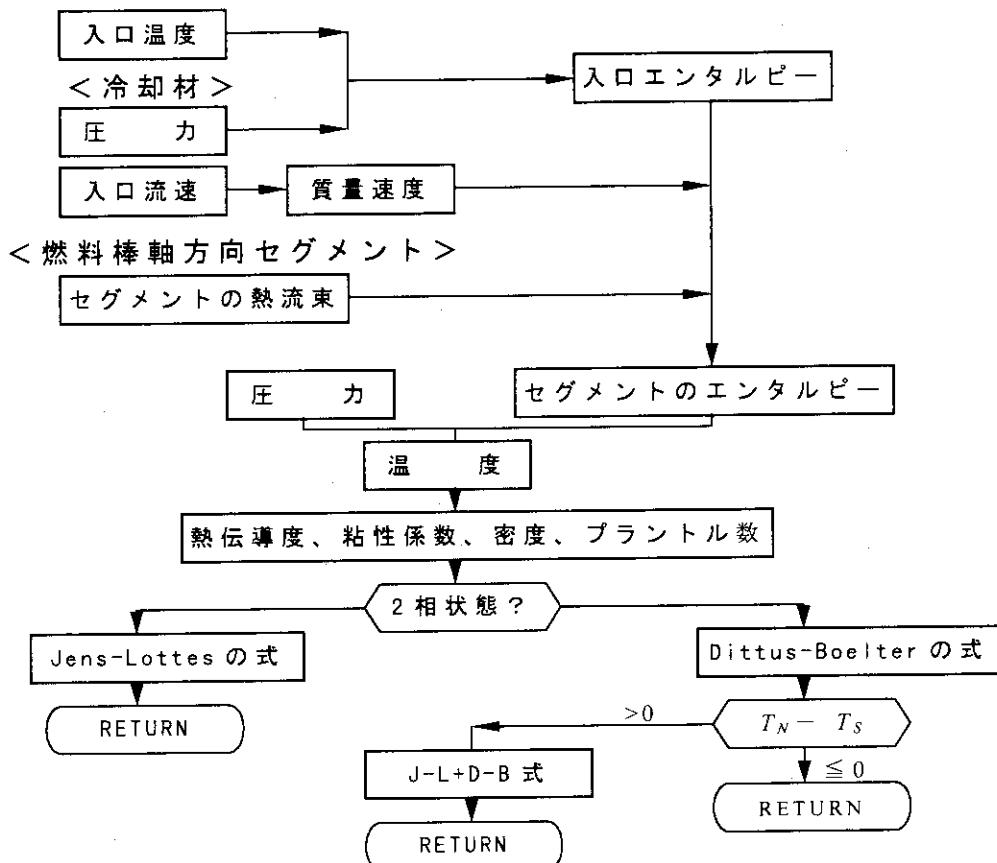


図 2.11 プログラムの流れ図

## (1)-7 流路相当直径および流路断面積

流路相当直径および流路断面積はともに被覆管表面温度を求めるために必要なパラメータである。流路相当直径は被覆管表面熱伝達係数を求めるために(2.1.13)式で使用され、流路断面積は各ノードのエンタルピーを計算するために(2.1.1)式で使用されている。

これら 2 つのパラメータは入力により直接指定されるものであるが、EXBURN-I では、値が入力により指定されていない場合には、互いに換算する方法や燃料棒間ピッチを用いて計算する方法が用意されている。したがって、流路相当直径、流路断面積、燃料棒ピッチのうち少なくとも一つは入力で指定しなければならない。以下にこれらの値の関係と算出方法を示す。

## [1] 流路相当直径

- 1) 流路相当直径を入力した場合は、その値を用いる。
- 2) 流路相当直径は入力されていないが流路断面積は入力されている場合は、次式により流路相当直径を求める。

$$D_e = \frac{4S}{2\pi r} \quad (2.1.16)$$

ここで、

$D_e$ :流路相当直径

$S$ :流路断面積

$r$ :燃料棒半径

である。

- 3) 流路相当直径、流路断面積ともに入力しない場合には燃料棒間のピッチを用いてこれらの値を計算する。図2.12におけるチャンネル③を想定し、流路断面積 $S$ を次式で与える。

$$S = 4l^2 - \pi r^2 \quad (2.1.17)$$

ここで $l$ は燃料棒間ピッチの $1/2$ である。

流路相当直径は流路断面積が求められた後、(2.1.16)式により計算される。

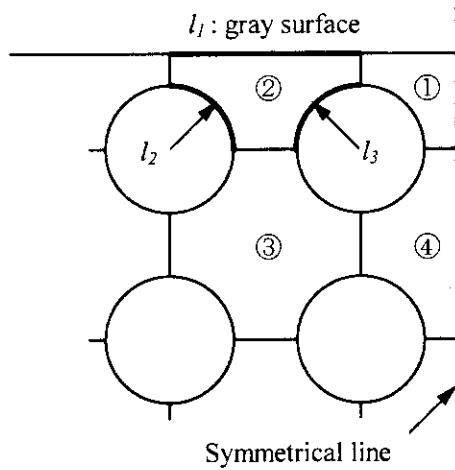


図2.12 チャンネルモデル

## [ 2 ] 流路断面積

- 1) 流路相断面積を入力した場合は、その値を用いる。  
2) 流路断面積は入力されていないが流路相当直径は入力されている場合は、次式により流路断面積を求める。

$$S = \frac{2\pi r D_e}{4} \quad (2.1.18)$$

- 3) 流路相当直径、流路断面積ともに入力しない場合には燃料棒間のピッチを用いて(2.1.17)式により流路断面積を計算する。

|                                     |
|-------------------------------------|
| 入力値                                 |
| 流路断面積、流路相当直径、燃料棒間のピッチは次の変数により入力される。 |
| PITCH …燃料棒間のピッチ (cm)                |
| FAREA …流路断面積 (cm <sup>2</sup> )     |
| DE …流路相当直径 (cm)                     |

## ( 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。酸化膜の成長速度は温度の関数であり、EXBURN-Iでは金属・酸化膜界面の温度の関数として計算される。界面温度は次節の熱計算により求める。

この熱計算に用いられる酸化膜の熱伝導度は、MATPRO-A モデルにより温度の関数として次の式で与えられる<sup>(21)</sup>。

$$C_N = 0.835 + 1.81 \times 10^{-4} T \quad (2.1.19)$$

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。

調整パラメータ OXFAC

酸化膜の熱伝導度は次式で調整される。

$$C_N = C_{N_0} \times OXFAC$$

また、酸化膜の比熱は MATPRO-A<sup>(21)</sup>により

$$C_P = 565 + 6.11 \times 10^{-2} T - 1.14 \times 10^7 T^{-2} \quad (2.1.20)$$

$(300 \leq T \leq 1478 K)$

で与えられる。ここで

$C_P$  : 被覆管酸化膜比熱 (J/kg·K)

$T$  : 温度 (K)

である。

また、酸化膜の成長（厚み増加）は、以下のように経験式により計算する。

酸化膜厚  $S$  の経験式は以下に示す EPRI モデル、もしくは MATPRO モデルのいず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  $T$ （ただし、これは次節の熱計算によって求められた値である）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。

入力値 初期酸化膜厚 OXTH(12)

初期酸化膜厚は OXTH( $\mu m$ )により各セグメント毎に指定できる。標準値は  $0.1 \mu m$ 。

EPRI モデル<sup>(22)</sup>

$$\text{遷移前腐食速度} : dS/dt = (A/S^2) \exp(-Q_1/R T) \quad (2.1.21)$$

$$\text{遷移後腐食速度} : dS/dt = C \exp(-Q_2/R T), \quad (2.1.22)$$

$$C = C_0 + U (M\phi)^P$$

$$\text{遷移の生じる酸化膜厚} : S_t = D \exp(-Q_3/R T - E T) \quad (2.1.23)$$

ただし

$dS/dt$  : 腐食速度 ( $\mu m/day$ )

$S$  : 酸化膜厚 ( $\mu m$ )

$T$  : 酸化膜と金属相の界面温度 (K)

$$\begin{aligned}
 \phi &: \text{高速中性子束} (\text{n/cm}^2\text{s}) \\
 R &: \text{気体定数} (1.987 \text{ cal/mol}\cdot\text{K}) \\
 A &= 6.3 \times 10^9 (\mu\text{m}^3/\text{day}), \quad Q_1 = 32289 (\text{cal/mol}) \\
 C_o &= 8.04 \times 10^7 (\mu\text{m}/\text{day}), \quad U = 2.59 \times 10^8 (\mu\text{m}/\text{day}) \\
 M &= 7.46 \times 10^{-15} (\text{cm}^2\text{s/n}), \quad P = 0.24 \\
 Q_2 &= 27354 (\text{cal/mol}), \quad D = 2.14 \times 10^7 (\mu\text{m}) \\
 Q_3 &= 10763 (\text{cal/mol}), \quad E = 1.17 \times 10^{-2} (\text{K}^{-1})
 \end{aligned}$$

である。

### MATPRO モデル<sup>(23)</sup>

$$\text{遷移前: } S = (4.976 \times 10^{-9} A \cdot t \cdot \exp(-15660/T) + S_o)^{1/3} \quad (2.1.24)$$

$$\text{遷移後: } S = 82.88 A \cdot t \cdot \exp(-14080/T) + S_{TRAN} \quad (2.1.25)$$

$$\text{遷移時の酸化膜厚: } S_{TRAN} = 7.749 \times 10^{-6} \exp(-790/T) \quad (2.1.26)$$

ここで、 $S$  : 酸化膜厚 (m)

$t$  : 時間 (days)

$A = 1.5$  (for PWR),  $= 9$  (for BWR)

である。

オプション選択 ICORRO

腐食速度式は ICORRO で選択する。

ICORRO=1:EPRI モデル、=2:MATPRO モデル(PWR)、=3:MATPRO モデル(BWR)

ところで、(2.1.19)式では、温度依存の項が定数項よりも 1 衍程度小さいため、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 2.14 参照)。そこで、EXBURN-I では、熱伝導度を酸化膜内で一様とし、酸化膜表面温度と界面の温度の平均値を酸化膜温度とし、(2.1.19)式によってその値を決定するものとした。

調整パラメータ FCORRO

腐食速度は次式により調整できる。

$$ds/dt = ds/dt (1 + FCORRO)$$

腐食の進行に伴う被覆管金属相の厚みの減少は、酸化相の体積と定量的な関係がある。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 1.56 倍となる。この比率を Piling-Bedworth Ratio という。 (図 2.13 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

$$S/PBR, \quad S * (PBR-1)/PBR$$

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、この厚み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解いている。

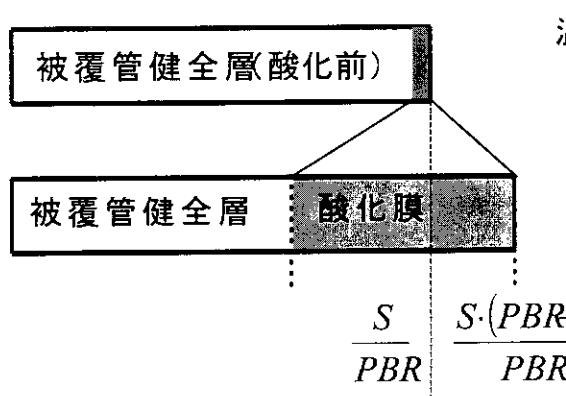


図 2.13 被覆管腐食による体積増加

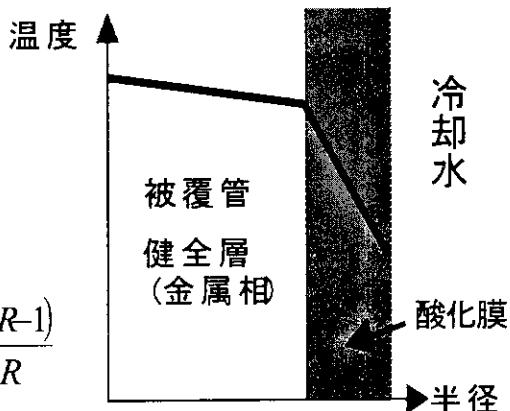


図 2.14 被覆管内温度分布

### (3) 半径方向一次元温度分布の計算法

燃料棒内の半径方向の温度分布の解析においては、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を用いる。ここで、燃料内の各要素における物性値は温度依存であると仮定し、軸方向の各位置でのギャップ熱伝達係数および被覆管表面温度は変化すると仮定する。これらの仮定に基づけば、燃料棒内の熱伝導は次式となる。

$$\frac{\partial}{\partial t} [c_v(T, r) T(r, t)] = \nabla k(T, r) \cdot \nabla T(r, t) + q(r, t) \quad (2.1.27)$$

ここで、

$u$  : 温度 (K)

$r$  : 径方向座標 (m)

$t$  : 時間 (s)

$C_v$  : 体積比熱 ( $J/m^3$ )

$k$  : 热伝導度 ( $W/m \cdot K$ )

$q$  : 単位体積あたりの発熱量 ( $J/m^3 \cdot s$ )

である。

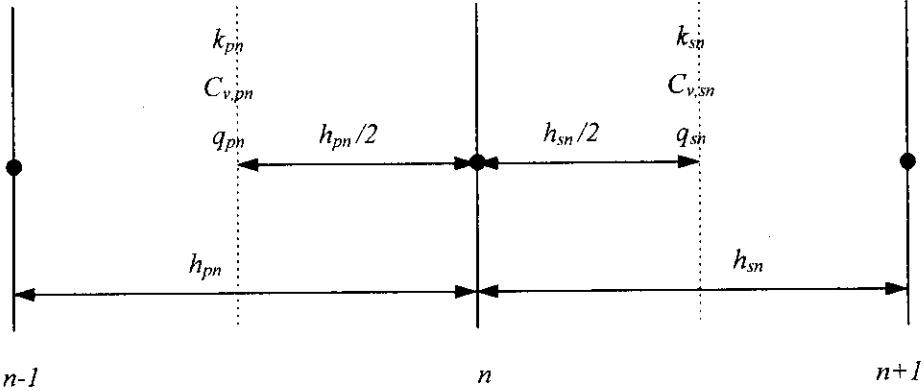


図 2.15 メッシュモデル

(2.1.27)式について体積積分を行う。ただし、積分体積は図 2.15 の破線で挟まれた部分の体積である。

$$\iiint_V \frac{\partial}{\partial} C_v(T, r) T(r, t) dV = \iiint_V \nabla k(T, r) \cdot \nabla T(r, t) dV + \iiint_V q(r, t) dV \quad (2.1.28)$$

1 次元問題であるので、体積の次元は径方向  $r$  を除いて、他は 1 とおく。共通ファクター  $2\pi$  を省略し、時間微分に対して前進差分法を用いると、(2.1.28)式の第 1 項は、

$$\begin{aligned} \iiint_V \frac{\partial}{\partial} [C_v(T, r) T(r, t)] dV &\approx \iiint_V C_v(T, r) \frac{\partial T}{\partial} (r, t) dV \\ &\approx \frac{(T_n^{m+1} - T_n^m)}{h_{pn}} \left[ C_{v,pn} \frac{h_{pn}}{2} \left( r_n - \frac{h_{pn}}{4} \right) + C_{v,sn} \frac{h_{sn}}{2} \left( r_n + \frac{h_{sn}}{4} \right) \right] \end{aligned} \quad (2.1.29)$$

となる。 $T_n^m$  は座標  $r_n$ 、時間  $t_m$  における温度であり、 $T_n^{m+1}$  は座標  $r_n$ 、時間  $t_{m+1}$  における温度である。(2.1.28)式の第 2 項は、

$$\begin{aligned} \iiint_V \nabla k(T, r) \cdot \nabla T(r, t) dV &= \iint_s k(T, r) \nabla T(r, t) \cdot d\bar{S} \\ &\approx -\frac{k_{pn}(T_n^{m+1/2} - T_{n-1}^{m+1/2})}{h_{pn}} \left( r_n - \frac{h_{pn}}{2} \right) + \frac{k_{sn}(T_{n+1}^{m+1/2} - T_n^{m+1/2})}{h_{sn}} \left( r_n + \frac{h_{sn}}{2} \right) \end{aligned} \quad (2.1.30)$$

となる。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。

ここで、便宜上、次の項目を定義する。

$$\begin{aligned} h_{pn}^V &= \frac{h_{pn}}{2} \left( r_n - \frac{h_{pn}}{4} \right), \quad h_{sn}^V = \left( r_n + \frac{h_{sn}}{4} \right) \\ h_{pn}^s &= \frac{1}{h_{pn}} \left( r_n - \frac{h_{pn}}{2} \right), \quad h_{sn}^s = \frac{1}{h_{sn}} \left( r_n + \frac{h_{sn}}{2} \right) \end{aligned} \quad (2.1.31)$$

$$D_n = C_{v,pn} h_{pn}^V + C_{v,sn} h_{sn}^V$$

次に(2.1.28)式の第3項での発熱項  $q(r,t)$  を変数分離し、

$$q(r,t) = Q(r)P_f P(t) \quad (2.1.32)$$

として与える。ここで、 $Q(r)$ は径方向相対出力分布、 $P_f$ は発熱密度の基準値であり、 $P(t)$ は時間に対する相対変化である。すると(2.1.28)式の第3項は、

$$\iiint_V q(r,t) dV \approx (Q_{pn} h_{pn}^V + Q_{sn} h_{sn}^V) P_f P(t_{m+1/2}) \quad (2.1.33)$$

となる。

以上の(2.1.28)式各項の近似式、(2.1.29)、(2.1.30)、および(2.1.33)式の右辺を合わせることにより、(2.1.28)式は  $n$  番目のメッシュ点について、

$$\begin{aligned} \frac{(T_{m+1} - T_n^m) D_n}{\Delta t} &= - \left( T_n^{m+1/2} - T_{n-1}^{m+1/2} \right) k_{pn} h_{pn}^s + \left( T_{n+1}^{m+1/2} - T_n^{m+1/2} \right) k_{sn} h_{sn}^s \\ &\quad + (Q_{pn} h_{pn}^V + Q_{sn} h_{sn}^V) P_f P\left(t_{n+1/2}\right) \end{aligned} \quad (2.1.34)$$

という差分近似式に変換される。(2.1.34)式についてクランクニコルソン法を適用すると、

$$\begin{aligned} \frac{(T_n^{m+1} - T_n^m) D_n}{\Delta t} &= \left( \frac{(T_n^{m+1} + T_n^m)}{2} - \frac{(T_{n-1}^{m+1} + T_{n-1}^m)}{2} \right) k_{pn} h_{pn}^s \\ &\quad + \left( \frac{T_{n+1}^{m+1} + T_{n+1}^m}{2} - \frac{T_n^{m+1} + T_n^m}{2} \right) k_{sn} h_{sn}^s \\ &\quad + (Q_{pn} h_{pn}^V + Q_{sn} h_{sn}^V) P_f \frac{P(t_{m+1}) + P(t_m)}{2} \end{aligned} \quad (2.1.35)$$

となる。ここで、熱伝導度  $k_{pn}$  および  $k_{sn}$  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。

(2.1.35)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。

$$a_n T_{n-1}^{m+1} + b_n T_n^{m+1} + c_n T_{n+1}^{m+1} = d_n^m$$

ここで、

$$\begin{aligned}
 a_n &= -\frac{k_{pn} h_{pn}^s \Delta t}{2}, \quad c_n = -\frac{k_{sn} h_{sn}^s \Delta t}{2} \\
 b_n &= D_n - a_n - c_n \\
 d_n^m &= -a_n T_{n-1}^m + (D_n + a_n + c_n) T_n^m - c_n T_{n+1}^m \\
 &\quad + \Delta t \left( Q_{pn} h_{pn}^V + Q_{sn} h_{sn}^V \right) P_f \left\{ \frac{P(t_{m+1}) + P(t_m)}{2} \right\}
 \end{aligned} \tag{2.1.36}$$

である。

次に、ギャップ領域を図 2.16 に示す。ギャップ領域については、(2.1.34)式と同様に

$$\begin{aligned}
 \frac{(T_n^{m+1} - T_n^m) D'_n}{\Delta t} &= -\left( T_{n+\frac{1}{2}}^{m+\frac{1}{2}} - T_{n-1}^{m+\frac{1}{2}} \right) k_{pn} h_{pn}^s + \left( T_{n+\frac{1}{2}}^{m+\frac{1}{2}} - T_n^{m+\frac{1}{2}} \right) h_g \\
 &\quad + Q_{pn} h_{pn}^V P_f P\left(t_{m+\frac{1}{2}}\right)
 \end{aligned} \tag{2.1.37}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{(T_{n+1}^{m+1} - T_{n+1}^m) D''_{n+1}}{\Delta t} &= -\left( T_{n+1}^{m+\frac{1}{2}} - T_n^{m+\frac{1}{2}} \right) h_g + \left( T_{n+2}^{m+\frac{1}{2}} - T_{n+1}^{m+\frac{1}{2}} \right) k_{s,n+1} h_{s,n+1}^s \\
 &\quad + Q_{s,n+1} P_f P\left(t_{m+\frac{1}{2}}\right)
 \end{aligned} \tag{2.1.38}$$

となる。ここで、 $D'_n = C_{v,pn} h_{pn}^V$ ， $D''_{n+1} = C_{v,s,n+1} h_{s,n+1}^V$ ， $h_g$  はギャップ熱伝達係数である。

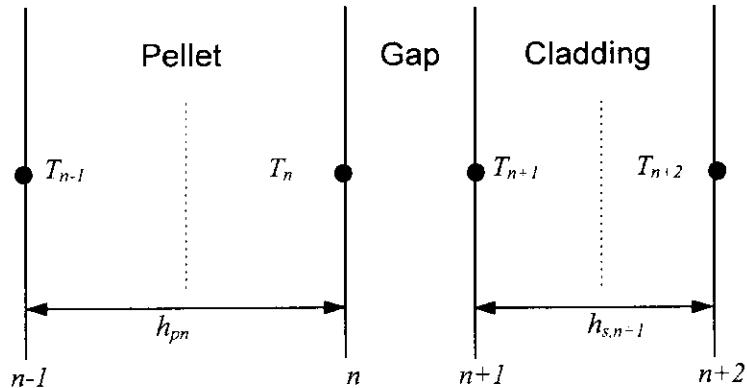


図 2.16 ギャップモデル

また、燃料棒中心領域を図 2.17(a)、被覆管表面領域を図 2.17(b)に示す。

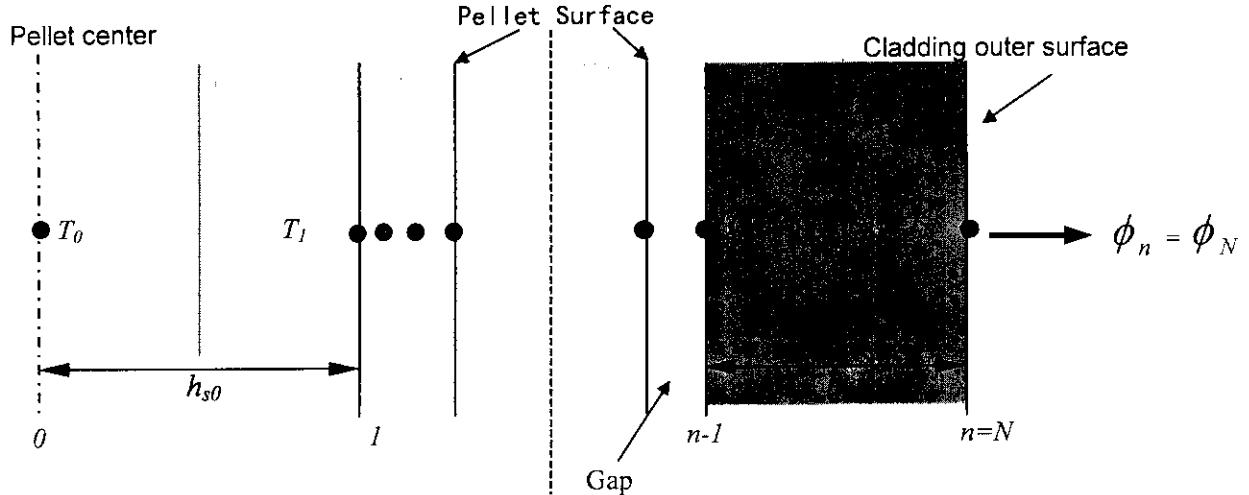


図 2.17(a) 燃料棒中心モデル

図 2.17(b) 被覆管表面モデル

燃料棒中心については(2.1.29)式は、

$$\frac{(T_0^{m+1} - T_0^m)}{\Delta t} C_{v,s0} = \left( T_1^{\frac{m+1}{2}} - T_0^{\frac{m+1}{2}} \right) k_{s0} h_{s0}^s + Q_{s0} h_{s0}^V P_f P \left( t_{\frac{m+1}{2}} \right) \quad (2.1.39)$$

である。

被覆管表面の境界方程式は、

$$\frac{(T_n^{m+1} - T_n^m)}{\Delta t} C_{v,pn} h_{pn}^V = - \left( T_n^{\frac{m+1}{2}} - T_{n-1}^{\frac{m+1}{2}} \right) k_{pn} h_{pn}^s - r_n \phi_n + Q_{pn} h_{pn}^V P_f P \left( t_{\frac{m+1}{2}} \right) \quad (2.1.40)$$

である。

(2.1.40)式の差分近似式を

$$a_n T_{n-1}^{m+1} + b_n T_n^{m+1} = d_n \quad (2.1.41)$$

の形式で表すと係数 \$a\_n, b\_n, d\_n\$ は、

$$a_n = - \frac{k_{pn} h_{pn}^s \Delta t}{2} \quad (2.1.42)$$

$$b_n = C_{v,pn} h_{pn}^V - a_n \quad (2.1.43)$$

$$\begin{aligned} d_n &= -a_n T_{n-1}^m + (C_{v,pn} h_{pn}^V - a_n) T_n^m \\ &\quad - \Delta t r_n \left( \frac{\phi_n^{m+1} + \phi_n^m}{2} \right) + \Delta t Q_{pn} h_{pn}^V P_f \left\{ \frac{P(t_{m+1}) + P(t_m)}{2} \right\} \\ &= d'_n + d''_n \phi_n^{m+1} \end{aligned} \quad (2.1.44)$$

となる。ここで \$\phi\_n\$ は被覆管表面熱流束である。

ただし、(2.1.44)式中の時刻 \$t\_m\$ における熱流束 \$\phi\_n^m\$ については、定常計算では

$$\phi_n^m = q^m / 2\pi r_n , \quad (2.1.45)$$

$q$  : 線出力(W/m)

で与える。これは、再メッシュ切りなどによって発生する差分誤差が、算出された熱流束に累積することを避けるためである。

(2.1.41)~(2.1.45)式において未知数は、 $T_{n-1}^{m+1}, T_n^{m+1}, \phi^{m+1}$  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。

$$T_{n-1}^{m+1} = -E_{n-1} T_n^{m+1} + F_{n-1} \quad (2.1.46)$$

(2.1.42)~(2.1.44)式および(2.1.46)式を(2.1.41)式に代入すると、

$$A_1 T_n^{m+1} + B_1 = \phi^{m+1} \quad (2.1.47)$$

ここで

$$A_1 = (b_n - a_n E_{n-1}) / d_n'' \quad (2.1.48)$$

$$B_1 = (a_n F_{n-1} - d_n') / d_n'' \quad (2.1.49)$$

である。すると  $A_1, B_1$  は既知量である。しかし(2.1.47)式は(2.1.2)式と等価であり、(2.1.2)式においては  $A, B$  は既知となるので、(1)~4 項で述べたように  $T_n^{m+1}$  を求めることができる。したがって、ガウスの消去法による後退代入を行えば、順次  $T_n^{m+1}$  を求めることができる。

なお、分布関数  $Q(r)$  については 2 通りの指定方法がある。1 つは、燃焼度の関数として入力で指定する方法であり、もう 1 つは、コードに内蔵してある Robertson の公式 (Halden 実験式)<sup>(24)</sup> を用いる方法である。

Robertson は発熱分布に関し次の表式を与えていた。

$$Q_1(R) = I_0(k \cdot R) + \frac{I_1(k \cdot R)}{K_1(k \cdot R)} \cdot K_0(k \cdot R) \quad (2.1.50)$$

ここで、

$I$  : 第 1 種変形ベッセル関数  $R_1$  : 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 ( $\text{cm}^{-1}$ )

である。

$k$  は次式で計算される。

$$k = 0.328(E \cdot D)^{0.8} + 0.54\left(\frac{0.5}{R_p}\right)^{0.82} \cdot (E \cdot D)^{0.19} \quad (2.1.51)$$

ここで、

$E$  :  $^{235}\text{U}$  濃縮度(%)

$D$  : ペレット理論密度比 (-)

$R_p$  : ペレット半径 (cm)

である。

Robertson の公式を二次関数で近似すると、以下のようにになる。

$$Q_2(r) = \frac{(b+2)(1-h^2)[(1-a)r^b + (a-h^b)]}{b(1-h^2)[a-h^b] + 2(1-h^b)[1-ah^2]} \quad (2.1.52)$$

ここで、  $r$ : 規格化半径 ( $0 \leq r \leq 1$ )

$a$  : ペレット内面对外面発熱密度比 (-)

$b$  : 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中心孔半径 (-)

である。

(2.1.52)式の 2 つの形状パラメータ  $a$  および  $b$  は、ハルデン炉の場合、次のように求める。

形状指数  $b$  は、(2.1.50)式が 2 次関数でよく近似できることから  $b=2$  とする。内面对外面発熱密度比  $a$  は(2.1.50)式を用いて、次のように表す。

$$a = \frac{Q_1(R_i)}{Q_1(R_p)} \quad (2.1.53)$$

オプション選択 IFLX

発熱密度分布  $Q(r)$  の指定方法は IFLX により以下のように選択できる。

・  $IFLX > 0$ : 入力、  $IFLX < 0$ : RODBURN の計算結果を利用、

・  $IFLX = 0$ : Robertson の公式を利用。

ただし、  $IFLX \neq 0$  の場合、発熱密度分布は燃焼度に対して内挿される。

### 2.1.2 ギャップ熱伝達

ギャップ熱伝達率は、Ross & Stout のモデルを修正した次式により表す<sup>(25)</sup>。

$$h = \frac{\lambda_{gas}}{C(R_{eff} + R_2) + (g_1 + g_2) + GAP} + \frac{\lambda_m \cdot P_c}{0.5 \cdot R^{1/2} \cdot H} + h_r \quad (2.1.54)$$

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、

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

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

$\lambda_p$  : ペレット熱伝導度 (W/cmK)、 $\lambda_c$  : 被覆管熱伝導度 (W/cmK)

$T_{po}$  : ペレット表面温度(K)、 $T_{ci}$  : 被覆管内面温度(K)

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

$\lambda_{gas}$  : 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) (2.1.3(5)項で説明する)

$R_{eff}$  : 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)

$$R = \sqrt{\frac{R_{eff}^2 + R_2^2}{2}}$$

$H$  : 被覆管メイヤー硬度 (Pa) ( $H = 2.8\sigma_y^{(23)}$ )

$\sigma_y$  : 降伏応力 (Pa)

$\sigma$  : ステファン・ボルツマン定数 (W/cm·K<sup>4</sup>) ( $\sigma = 5.67 \times 10^{-12}$ )

$\varepsilon_p$  : ペレット放射率 (-)

$\varepsilon_c$  : 被覆管放射率 (黒色酸化被膜) (-)

である。 $\lambda_{gas}, g_1 + g_2$  の表式を以下に示す。

調整パラメータ  $R_{eff}, R2$

ペレットおよび被覆管の見かけの表面粗さ  $R_{eff}$  および  $R_2$  は、それぞれ R1 および R2 で指定できる。標準値はいずれも 1μm。

## (1) 混合ガス熱伝導度

MATPRO-09 モデルより次のように表される<sup>(23)</sup>。

$$\lambda_{gas} = \sum_{i=0}^n \left( \frac{\lambda_i}{1 - \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^n \phi_{ij} \frac{x_j}{x_i}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.1.55)$$

ただし、

$$\phi_{ij} = \frac{\left[ 1 + \left( \frac{\lambda_i}{\lambda_j} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{M_i}{M_j} \right)^{\frac{1}{4}} \right]^2}{2^{\frac{3}{2}} \left( 1 + \frac{M_i}{M_j} \right)^{\frac{1}{2}}} \left[ 1 + \frac{2.41(M_i - M_j)(M_i - 0.142M_j)}{(M_i + M_j)^2} \right] \quad (2.1.56)$$

ここで、

$x_i$  : ガス i のモル比

$\lambda_i$  : ガス i の熱伝導度 (W/cm·K)

$M_i$  : ガス i モル重量

## オプション選択 IAR

ガスの種類はヘリウム、窒素、クリプトン、キセノンであるが、窒素の代わりにアルゴンを指定できる。  
この場合は IAR='AR' と指定する。

である。ガスの種類として、ヘリウム、窒素（またはアルゴン）、クリプトンおよびキセノンを考える。ガス組成は、クリプトンおよびキセノンが FP ガスであるため、FP 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

固気間温度ジャンプ距離は次式で与えられる。

$$g_1 + g_2 = \sum_{i=1}^n (g_1 + g_2)_i \cdot \frac{10^5}{P_{gas}} \quad (2.1.57)$$

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 & Stoute の結果から、ヘリウム、窒素（又はアルゴン）、クリプトンおよびキセノンに対してそれぞれ  $10 \times 10^{-4}$ 、 $5 \times 10^{-4}$ 、 $1 \times 10^{-4}$  および  $1 \times 10^{-4}$  (cm) を用いる。

ガス圧力  $P_{gas}$  の計算については、後の(2.1.213)式で説明する。

## オプション選択 IGAPCN

IGAPCN の指定によりここに述べたモデル以外も

選択できる。（2.3 物性値を参照） IGAPCN=0:修正 Ross&Stoute モデル、=1:MATPRO-09 モデル、=2:Ross&Stoute モデル、=3:修正 Dean モデル

### 2.1.3 接触力評価モデル

(2.1.52)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。このため、EXBURN-Iにおいては、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。

- ペレットおよび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。

$$u_f = u^{rel} + \sum_{i=1}^{10} (\varepsilon_i^{th} + \varepsilon_i^{den} + \varepsilon_i^{ss} + \varepsilon_i^u + \varepsilon_i^c) \Delta r_i \quad (2.1.58)$$

ここで、

$u_f$  : ペレットの半径方向変位 (cm)

$u^{rel}$  : ペレットのリロケーションによる半径方向変位 (cm)

$\varepsilon_i^{th}$  : リング  $i$  の熱ひずみ (-)

$\varepsilon_i^{den}$  : リング  $i$  のやきしまり (-)

$\varepsilon_i^{ss}$  : リング  $i$  の固体 FP (拘束) スウェリング (-)

$\varepsilon_i^u$  : リング  $i$  の気体 FP (非拘束) スウェリング (-)

$\varepsilon_i^c$  : リング  $i$  のクリープひずみ (-)

$\Delta r_i$  : リング  $i$  の幅 (cm)

$i$  : リングの番号 (半径方向に 10 リング固定とする)

である。

このうち、 $\varepsilon_i^{th}$ ,  $\varepsilon_i^{den}$ ,  $\varepsilon_i^{ss}$  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。 $\varepsilon_i^u$ ,  $\varepsilon_i^c$  については接触状態に依存する。ペレットの気体 FP スウェリングは非拘束下 (接触力 0) でのみ発生可能であると仮定し、またペレットのクリープは接触力がかかった状態でのみ圧縮クリープが発生すると仮定した。

調整パラメータ XRELOC ベレットの初期リロケーション量である半径方向変位  $u^{rel}$  は、 $u^{rel} = [\text{初期ギャップ幅}] \times \text{XRELOC}$  で与えられる。XRELOC は入力パラメータであり、標準値 = 0.2 である。

ペレットのクリープひずみ速度式は、MATPRO-09 の式<sup>(23)</sup>、

$$\dot{\varepsilon}^c = \frac{(A_1 + A_2 F) \bar{\sigma} e^{-Q_1/RT}}{(A_3 + f_d) G^2} + \frac{A_4 \bar{\sigma}^{4.5} e^{-Q_2/RT}}{(A_6 + f_d)} + A_7 \bar{\sigma} F e^{-Q_3/RT} \quad (2.1.59)$$

を用いる。ここで、

$$A_1 = 9.728 \times 10^6 \quad , \quad Q_1 = 90,000$$

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

$$A_3 = -87.7 \quad , \quad Q_3 = 5,200$$

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

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

$\dot{\varepsilon}^c$  : 相当クリープひずみ速度 (hr<sup>-1</sup>)

$F$  : 核分裂速度 (=10<sup>19</sup> fissions/m<sup>3</sup>·s を EXBURN-I では指定している。)

$\bar{\sigma}$  : 相当応力 (psi)

$R$  : ガス定数 (1.987 cal/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 ( $\mu\text{m}$ )

調整パラメータ TCRMX

クリープひずみ速度で用いる温度に対し上限値を TCRMX で与えることができる。

標準値は 1773.15K。

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ペレット温度については、指定の上限温度 TCRMX 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、平面応力条件を仮定して  $\sigma_z = 0$  であるので、 $\sigma_r \approx \sigma_\theta = -P_{fc}$  (接触圧力) を仮定すると、 $\bar{\sigma} = P_{fc}$  となる。

この条件によりクリープひずみ速度成分を求める

$$\begin{Bmatrix} \dot{\varepsilon}_{r,i}^c \\ \dot{\varepsilon}_{z,i}^c \\ \dot{\varepsilon}_{\theta,i}^c \end{Bmatrix} = \frac{\dot{\varepsilon}_i^c}{2\bar{\sigma}} \begin{Bmatrix} 2\sigma_r - \sigma_\theta \\ -\sigma_r - \sigma_\theta \\ 2\sigma_\theta - \sigma_r \end{Bmatrix} = \frac{\dot{\varepsilon}_i^c}{2} \begin{Bmatrix} -\frac{1}{2} \\ 1 \\ -\frac{1}{2} \end{Bmatrix} \quad (2.1.60)$$

となり、周方向クリープ速度は

$$\dot{\varepsilon}_{\theta,i}^c = -\frac{1}{2} \dot{\varepsilon}_i^c \quad (2.1.61)$$

となる。

## (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。

$$u = \frac{r_{ci}}{E} \left[ \frac{(P_{gas} + P_{fc})(r_{ci}^2 + r_{co}^2) - 2P_w r_{co}^2}{r_{co}^2 - r_{ci}^2} + \nu P_{gas} \right] + (\varepsilon^{th} + \varepsilon^c) \frac{r_{co} + r_{ci}}{2} \quad (2.1.62)$$

ここで、

$u$  : 被覆管の半径方向変位 (cm)

$E$  : 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)

$P_{fc}$  : ペレットと被覆管の接触圧 (Pa)

$P_w$  : 冷却水圧 (Pa)

$\nu$  : 被覆管のポアソン比

$\varepsilon^{th}$  : 被覆管の熱ひずみ

$\varepsilon^c$  : 被覆管のクリープひずみ

である。

被覆管の応力の円周および軸方向成分は、薄肉円筒殻理論（シェルモデル）を適用して、

$$\sigma_\theta = \frac{r_{ci}(P_{fc} + P_{gas}) - r_{co}P_w}{r_{co} - r_{ci}} \quad (2.1.63)$$

$$\sigma_z = \frac{r_{ci}^2(P_{fc} + P_{gas}) - r_{co}^2P_w}{r_{co}^2 - r_{ci}^2} \quad (2.1.64)$$

で与えられる。ただし、非接触時については  $P_{fc} = 0$  である。

ここで、相当応力は、剪断成分を考えないモデルなので

$$\bar{\sigma} = \left[ \frac{1}{2} \left\{ (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + \sigma_\theta^2 + \sigma_z^2 \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.1.65)$$

とする。

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

$$d\bar{\varepsilon}^c = f(\bar{\sigma}, T, \phi, \bar{\varepsilon}^c) \cdot dt \quad (2.1.66)$$

で与える。ただし、 $f$  を決定するために、被覆管クリープ式が必要である。これには MATPRO-09 の式<sup>(23)</sup> あるいは燃安専の式<sup>(26)</sup>のいづれかを選択する。（式の詳細な形は2. 3. 2節参照）

関数  $f = \dot{\varepsilon}^c$  は、時間を陽に含まない。したがって、クリープ式を変形して  $\dot{\varepsilon}^c$  の表式より時間  $t$  を消去する。

1) MATPRO-09 式は

$$\dot{\varepsilon} = K\phi(\sigma + B \exp(C\sigma)) \exp(-10000 / RT)t^{-0.5} \quad (1)$$

の形をしている。①式を  $t$  について積分すると、

$$\varepsilon = 2K\phi(\sigma + B \exp(C\sigma)) \exp(-10000 / RT)t^{0.5} \quad (2)$$

②式は、 $t$  のべき乗が 1 でなく、一次クリープの式であるから

$$\varepsilon_H = \varepsilon \text{ (全クリープひずみ) である。}$$

①および②式より  $t$  を消去して

$$\dot{\varepsilon} = 2\{K\phi(\sigma + B \exp(C\sigma)) \exp(-10000 / RT)\}^2 / \varepsilon$$

したがって

$$f = \dot{\varepsilon}^c = 2\{K\phi(\sigma + B \exp(C\sigma)) \exp(-10000 / RT)\}^2 / \bar{\varepsilon}^c \quad (2.1.67)$$

となる。ここで

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

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

$\phi$  : 高速中性子束 ( $n/m^2/s$ )

$\bar{\sigma}$  : 相当応力 (Pa)

$T$  : 温度 (K)

$R$  : ガス定数 (1.987 cal/mol/K)

である。

2) 燃安専の式の場合、

$$\begin{aligned} \text{クリープひずみ速度式: } \dot{\varepsilon}^c &= \dot{\varepsilon}_{th}^c + \dot{\varepsilon}_{irr}^c \\ \dot{\varepsilon}_{th}^c &= mK^m \varepsilon_H^{(1-\frac{1}{m})} \\ \dot{\varepsilon}_{irr}^c &= 6.64 \times 10^{-25} \phi^{1.23} \sigma_{eq}^{1.34} \end{aligned}$$

の形をしているので、時間  $t$  を消去する必要はなく、 $f = \dot{\varepsilon}^c$  とおく。

円周方向および軸方向のクリープひずみ増分は、

$$d\varepsilon_\theta^c = \frac{1}{2\bar{\sigma}} (2\sigma_\theta - \sigma_z) \cdot d\bar{\varepsilon}^c \quad (2.1.68)$$

$$d\varepsilon_z^c = \frac{1}{2\bar{\sigma}} (2\sigma_z - \sigma_\theta) \cdot d\bar{\varepsilon}^c \quad (2.1.69)$$

である。なお、(2.1.66)式中の $\bar{\varepsilon}^c$ については

$$\bar{\varepsilon}^c = \bar{\varepsilon}_n^c + \theta \cdot d\bar{\varepsilon}^c \quad \left( \theta = \frac{1}{2} \right) \quad (2.1.70)$$

として与え、繰り返し収束計算により $\bar{\varepsilon}^c$ を求める。

また、(2.1.62)式中の $\varepsilon^c$ は、タイムステップ番号を $m$ 、現ステップのタイムステップ番号を $n+1$ として

$$\varepsilon^c = \varepsilon_{\theta,n+1}^c = \sum_{m=1}^{n+1} d\varepsilon_{\theta,m}^c \quad (2.1.71)$$

で与える。

### (3) ペレットクラックの形状変化・移動モデル

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、移動する。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2.18に示すように、半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。

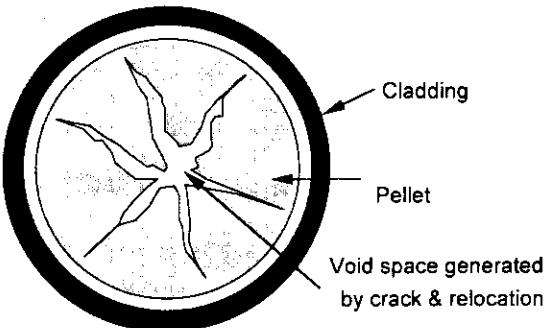


図 2.18 ペレット初期状態のクラック（半径方向クラック）

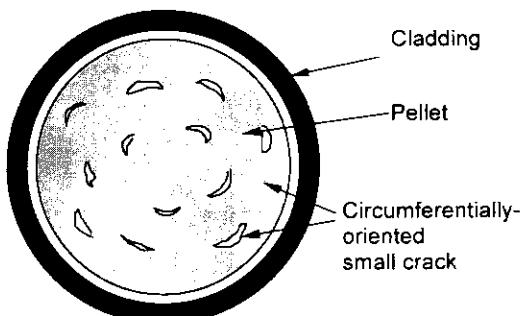


図 2.19 十分燃焼が進んだ後のクラック状態（周方向クラック）

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方向マイクロクラックに移行し、最終的には、図2.19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2.20に示すように各クラックの空隙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。ここで、初期の半径方向クラック発生によるリロケーション量は、XRELOCにより指定される。（Page 30 参照）

ただし、クラックの全空隙体積は形状変化・移動によっては変化しない。

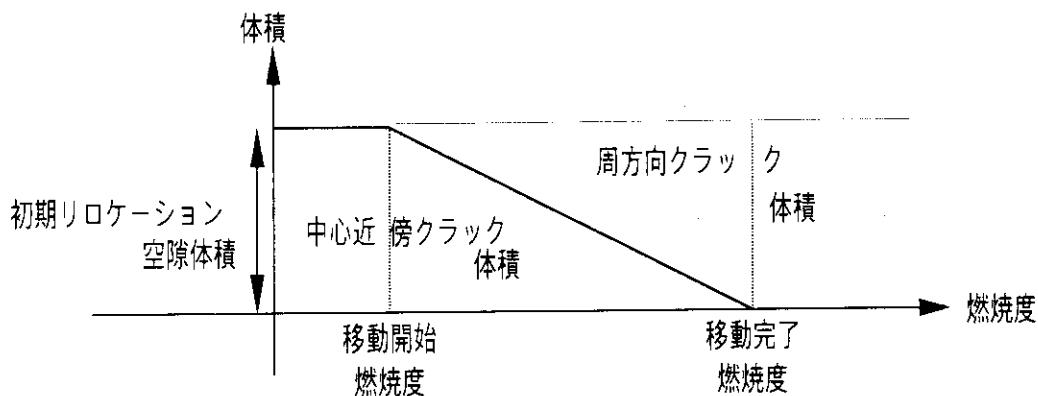


図 2.20 燃焼の進行とクラック形状・体積の変化

また、被覆管と接触したときの接触力によるペレット体積の縮小は、周方向クラックの体積減少分のみが担うものとし、中心近傍のクラック体積は接触力に依らず変化しないと仮定する。

したがって、クラック移動開始以前の燃焼度領域ではペレットの割れによるみかけの剛性の変化は存在せず、ペレットのヤング率には本来の物性値としての値を用いる。このときペレット・被覆管の接触力はペレット・被覆管の仮想的重なり ( $\delta_{fc}$ ) に比例して増加する。

移動開始燃焼度以後の燃焼度領域では、周方向クラック体積の増加に比例して、ペレットの割れによるみかけの剛性変化を扱うこととなり、次項以降で説明するペレットのヤング率が変化する「剛性回復」モデルに移行する。

移動完了燃焼度に到達すると、移動によるクラック形状変化は完了し、ペレットの割れによるみかけの剛性変化は最もゆるやかな状態になる。

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。

#### 調整パラメータ BUMIN, BUMAX

クラックの移動開始燃焼度と移動完了燃焼度は BUMIN と BUMAX で与えることができる。BUMIN と BUMAX の標準値はともに 0(Mwd/t-U)である。すなわち標準ではクラックの移動は最初からすでに完了しているものとして扱う。

#### (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「剛性回復モデル」により表現する。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<sup>(1)</sup>。

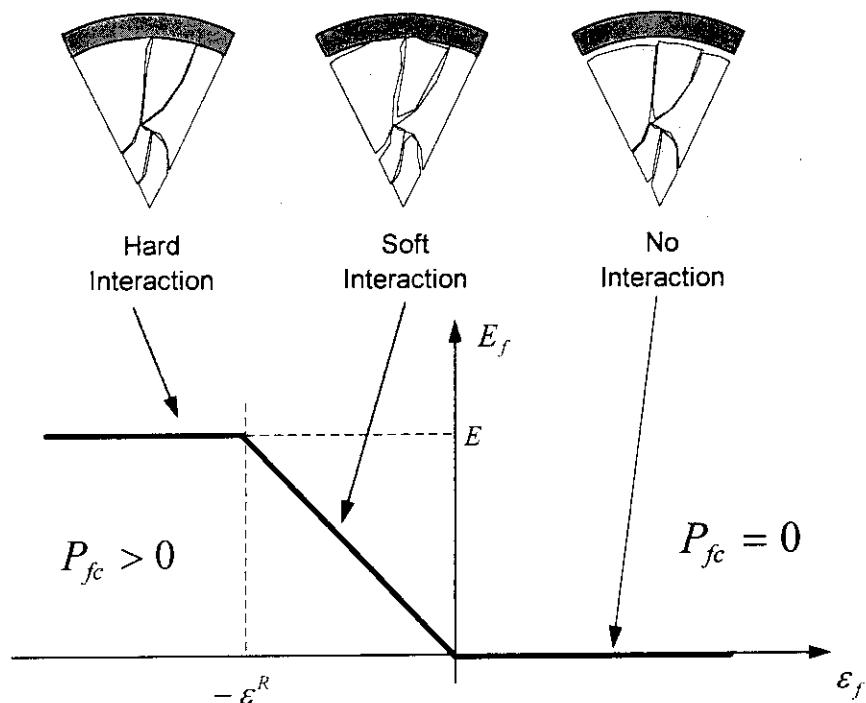


図 2.21 割れたペレットのヤング率

周方向クラック発生によるリロケーションによるペレット半径方向変位量（片側）を  $\delta_{crk}$ 、ペレットが被覆管により半径方向に圧縮されたときの変位を  $\delta_f (> 0)$  とすれば、 $\delta_f = 2\delta_{crk}$  でペレットが本来の剛性を回復すると仮定する。 ((2.1.74)式を参照)

図 2.21 より、半径方向のペレットヤング率は次のように与えられる。

$$E_f = \begin{cases} 0 & (0 \leq \epsilon_f) \\ -\frac{E}{\epsilon_R} \epsilon_f & (-\epsilon_R < \epsilon_f < 0) \\ E & (\epsilon_f \leq -\epsilon_R) \end{cases} \quad (2.1.72)$$

ここで、

$E_f$  : ペレットの見かけのヤング率

$\epsilon_f$  : ペレットが被覆管の接触力によりペレットが半径方向に圧縮されるひずみ ( $\epsilon_f < 0$ )

$E$  : ペレットの本来のヤング率 (物性値)

$\epsilon_R$  : ペレットが完全に剛性を回復した時の、被覆管に押されて失った変位に相当する分のひずみ ( $\epsilon_R > 0$ )

である。したがって、

$$\varepsilon_f = -\frac{\delta_f}{r_{po}} \quad (2.1.73)$$

ここで、

$r_{po}$  : ペレット外半径

であり、周方向クラックによるペレット片側変位量については、周方向クラックによる半径方向ひずみを  $\varepsilon_{crk}$  として

$$\delta_{crk} = r_{po} \varepsilon_{crk} \quad (> 0) \quad (2.1.74)$$

である。

$\varepsilon_R (> 0)$  は次のように決定する。

$$\begin{aligned} -\varepsilon_R &= (\text{周方向クラックによるひずみの失われた分, } < 0) \\ &+ (\text{弾性圧縮ひずみ, } < 0) \end{aligned}$$

すなわち、

$$-\varepsilon_R = \bar{\varepsilon}_{crk} + \frac{\sigma_R}{E} \quad (2.1.75)$$

ここで、

$\bar{\varepsilon}_{crk} : = -\varepsilon_{crk}$  、周方向クラックによるひずみの失われた分

$\sigma_R$  : ペレットが完全に剛性を回復したときの、被覆管から受けた圧縮応力

である。 (図 2.22 参照)

なお、(3)項で示したとおり、周方向クラックによるひずみの失われた分  $\bar{\varepsilon}_{crk}$  は、リロケーションひずみ  $\varepsilon_{rel}$  に対して燃焼度の関数として次のように与えられる。

$$\bar{\varepsilon}_{crk} = \begin{cases} 0 & (Bu \leq Bu_{min}) \\ -\frac{Bu - Bu_{min}}{Bu_{max} - Bu_{min}} \varepsilon_{rel} & (Bu_{min} < Bu < Bu_{max}) \\ -\varepsilon_{rel} & (Bu_{max} \leq Bu) \end{cases} \quad (2.1.76)$$

ただし

$Bu$  : 燃焼度

$Bu_{min}$  : クラックの移動開始燃焼度

$Bu_{max}$  : クラックの移動完了燃焼度

$$\varepsilon_{rel} : \text{リロケーションひずみ} = XRELOC \cdot \frac{\delta_0}{r_{po}}$$

$\delta_0$  : 半径方向初期ギャップ幅

である。

一方、(2.1.72)式より、 $\varepsilon_f$  が  $E_f$  の決定に現れるのは、 $-\varepsilon_R < \varepsilon_f < 0$  の区間だけなので、  
 $\frac{d\sigma_f}{d\varepsilon_f} = E_f$  の関係を用いると、

$$\sigma_f = -\frac{E}{\varepsilon_R} \frac{\varepsilon_f^2}{2} \quad (-\varepsilon_R < \varepsilon_f < 0) \quad (2.1.77)$$

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

$$\varepsilon_f = -\sqrt{\frac{2\varepsilon_R(-\sigma_f)}{E}} \quad (2.1.78)$$

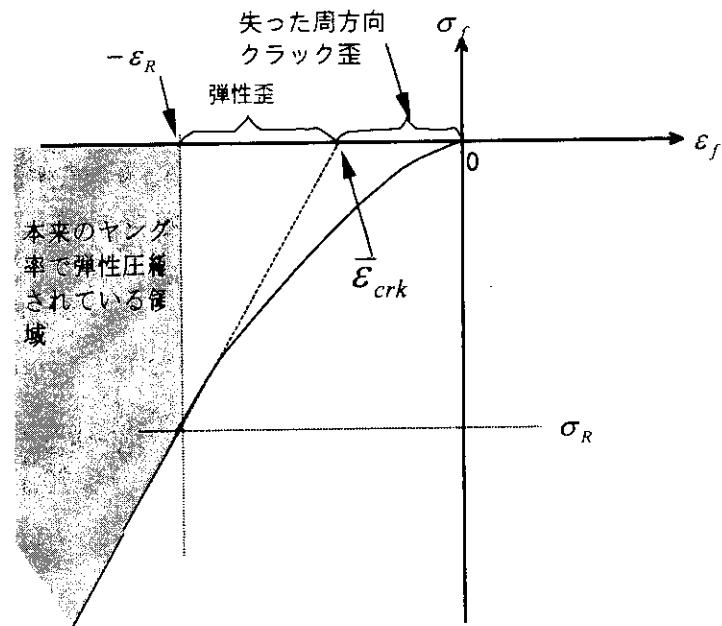


図 2.22 割れたペレットの応力とひずみの関係

(2.1.77)式を(2.1.72)式の区間  $-\varepsilon_R < \varepsilon_f < 0$  に代入して  $E_f$  について解くと、

$$E_f = \sqrt{\frac{2E(-\sigma_f)}{\varepsilon_R}} \quad (2.1.79)$$

となる。

$\varepsilon_f = -\varepsilon_R$  のとき、 $E_f = E$  の関係を(2.1.77)式に代入して  $\sigma_R$  を求めると、

$$\sigma_R = -\frac{E\varepsilon_R}{2} \quad (2.1.80)$$

(2.1.80)式を(2.1.75)式に代入すると、

$$\varepsilon_R = 2\varepsilon_{crk} \quad (2.1.81)$$

である。

(2.1.73)および(2.1.80)式を(2.1.72)式に代入すると、 $E_f$  は次のように与えられる。

$$E_f = \frac{E}{2\epsilon_{crk}} \cdot \frac{\delta_f}{r_{po}} \quad (-\epsilon_R < \epsilon_f, \text{ i.e., } \delta_f < 2r_{po}\epsilon_{crk}) \\ E_f = E \quad (\epsilon_f \leq \epsilon_R, \text{ i.e., } \delta_f \geq 2r_{po}\epsilon_{crk}) \quad (2.1.82)$$

### (5) ギャップ幅と接触力

ここでは、ペレット-被覆管接触力  $P_{fc}$  を、ペレットと被覆管の半径方向変位の（仮想的な）重なり量  $\delta_{fc}$  および(4)項で示した剛性回復モデルの仮定に基づいて算出する方法を説明する。

接触力  $P_{fc}$  は、ペレットと被覆管が接触したとき、この重なり  $\delta_{fc}$  をなくすよう互いに押し戻されて平衡したときに（重なり量  $\delta_{fc} = 0$ ）接触面に発生する力である。接触力  $P_{fc}$  は、ペレットと被覆管が接触している状態の被覆管の半径方向変位量がわかれば、被覆管の内外半径、厚み、およびヤング率から、被覆管がペレットに押される力＝被覆管がペレットを押す力、として求められる。

ペレットと被覆管の間のギャップ幅は次式で与えられる。

$$\delta = \delta_o + u_c - u_f \quad (2.1.83)$$

ここで、

$\delta$  : ペレットと被覆管の間の半径ギャップ幅 (m)

$\delta_o$  : 製造時のギャップ幅 (m)

$u_c$  : 被覆管の半径方向変位 (m)

$u_f$  : ペレットの半径方向変位 (m)

である。あるタイムステップの開始時において  $\delta < 0$  と算出されると、ペレットと被覆管は接触状態にあると判定し、接触力  $P_{fc}$  が計算される。このとき数値計算上、ペレットと被覆管が

$$\delta_{fc} = -\delta = -(\delta_o + u_c - u_f) > 0 \quad (2.1.84)$$

の幅だけ（仮想的に）重なっている状態にある。すなわち、 $\delta_{fc}$  はそのタイムステップの開始時において既知である。

重なり幅  $\delta_{fc} > 0$  の場合、 $\delta_{fc} = 0$  となるところまで被覆管とペレットが互いに押し戻しあうと考える。このとき、被覆管がペレットを内側に押し戻したときのペレットの押し戻し変位量を  $\delta_f$ 、被覆管がペレットにより外側に押し抜けられたときの、被覆管の押し抜けられた変位量を  $\delta_c$  とすれば、

$$\delta_{fc} = \delta_f + \delta_c \quad (2.1.85)$$

と書ける。

ペレット側では、 $\varepsilon_r = \varepsilon_\theta$  とすれば、 $\delta_f$  を用いて、径方向歪み $\varepsilon_r$  および接触力 $P_{fc}$  に対して

$$\begin{aligned} \varepsilon_r = \varepsilon_\theta &= \frac{\delta_f}{r_{ci}} \\ P_{fc} &= E_f \left( \frac{\delta_f}{r_{ci}} \right) \end{aligned} \quad (2.1.86)$$

が成り立つ。ここで、

$E_f$  : ペレットの見かけの（実効的）ヤング率

$r_c$  : 被覆管内半径 (=接觸時でのペレット外半径( $r_{po}$ ))

である。

また、被覆管側では、 $\varepsilon_\theta = \delta_c / r_{ci}$  より、 $E_c$  を被覆管のヤング率として

$$\sigma_\theta = E_c \varepsilon_\theta = E_c \frac{\delta_c}{r_{ci}} \quad (2.1.87)$$

$$P_{fc} = \sigma_r = \sigma_\theta \frac{t}{r_{ci}} = E_c \frac{\delta_c}{r_{ci}} \cdot \frac{t}{r_{ci}} \quad (2.1.88)$$

$t = r_{co} - r_{ci}$  : 被覆管肉厚

すなわち、

$$P_{fc} = E_c \frac{\delta_c (r_{co} - r_{ci})}{r_{ci}^2} \quad (2.1.89)$$

が成り立つ。

(2.1.85)～(2.1.89)式より  $P_{fc}$  を消去し、 $\delta_f$ 、 $\delta_c$ について解くと、

$$\delta_f = \frac{E_c (r_{co} - r_{ci})}{E_c (r_{co} - r_{ci}) + E_f r_{ci}} \delta_{fc} \quad (2.1.90)$$

$$\delta_c = \frac{E_f r_{ci}}{E_c (r_{co} - r_{ci}) + E_f r_{ci}} \delta_{fc} \quad (2.1.91)$$

を得る。ただし、(2.1.90)式、(2.1.91)式は力のつりあいから求めた式で、 $\delta_{fc}$  中には「周方向クラックによる変位分」も含まれているために、厳密には成り立たない。

ここで、未知量の一つであるペレットの見かけのヤング率 $E_f$  については(2.1.72)式および(2.1.82)式より、次のようになる。

- ①  $\delta_f = 0$  のとき、  $E_f = 0$
- ②  $0 < \delta_f < 2\delta_{crk}$  のとき、  $E_f = \frac{\delta_f}{2\delta_{crk}} E$  (2.1.92)
- ③  $\delta_f \geq 2\delta_{crk}$  のとき、  $E_f = E$  (本来の物性値)

そこで、これらを利用して(2.1.90)式、(2.1.91)式中の $\delta_{fc}$ に含まれる「周方向クラックによる変位分」を考慮して改めて関係式を定義する。

$\delta_f \geq 2\delta_{crk}$  のときには、ペレットは周方向クラックによる径方向変位量 $\delta_{crk}$ をすべて失って  $E_f = E$ となるので、(2.1.90)式、(2.1.91)式は次の関係式に書き換えられる。

$$\delta_f = \frac{E_c(r_{co} - r_{ci})}{E_c(r_{co} - r_{ci}) + Er_{ci}} (\delta_{fc} - \delta_{crk}) + \delta_{crk} \quad (2.1.93)$$

$$\delta_c = \frac{Er_{ci}}{E_c(r_{co} - r_{ci}) + Er_{ci}} (\delta_{fc} - \delta_{crk}) \quad (2.1.94)$$

また、 $\delta_f = 2\delta_{crk}$  のとき、 $\delta_{fc}$ を求める

$$\delta_{fc} = \delta_f + \delta_c = 2\delta_{crk} + \frac{Er_{ci}}{E_c(r_{co} - r_{ci}) + E} \frac{r_{ci}}{r_{ci}} (\delta_{fc} - \delta_{crk})$$

より、

$$\delta_{fc} = 2\delta_{crk} + \frac{Er_{ci}}{E_c(r_{co} - r_{ci})} \delta_{crk} \quad (2.1.95)$$

となる。

そこで、(2.1.92)式の③の区間すなわち、 $\delta_{fc} \geq 2\delta_{crk} + \frac{Er_{ci}}{E_c(r_{co} - r_{ci})} \delta_{crk}$  では(2.1.94)式で $\delta_c$ が与えられることがわかる。

次に(2.2.92)式の②の区間すなわち、 $0 < \delta_{fc} < 2\delta_{crk} + \frac{Er_{ci}}{E_c(r_{co} - r_{ci})} \delta_{crk}$  における $\delta_c$ の導出方法について示す。②の区間では、(2.1.90)式、(2.1.91)式は(2.1.93)式、(2.1.94)式と同様に次の関係式に書き換えられる。

$$\delta_f = \frac{E_c(r_{co} - r_{ci})}{E_c(r_{co} - r_{ci}) + E_f r_{ci}} (\delta_{fc} - \tilde{\delta}_{crk}) + \tilde{\delta}_{crk} \quad (2.1.96)$$

$$\delta_c = \frac{E_f r_{ci}}{E_c(r_{co} - r_{ci}) + E_f r_{ci}} (\delta_{fc} - \tilde{\delta}_{crk}) \quad (2.1.97)$$

ここで、 $\tilde{\delta}_{crk}$  ( $> 0$ ) は周方向クラックによるペレット変位である。 $\tilde{\delta}_{crk}$  は図 2.21 に示した応力とひずみの関係式の接線と $\varepsilon_f$ 軸とが交わる点と原点との距離に $r_{po}$ を掛けた値に相当する。

$\tilde{\varepsilon}_{crk}$  は以下のように算出する。周方向クラックひずみ  $\tilde{\varepsilon}_{crk}$  を用いて、次の関係式が成り立つ。

$$\sigma_f = E_f (\varepsilon_f + \tilde{\varepsilon}_{crk}) \quad (2.1.98)$$

この関係式に、(2.1.72)式および(2.1.77)式を代入すると、

$$-\frac{E}{\varepsilon_R} \frac{\varepsilon_f^2}{2} = -\frac{E}{\varepsilon_R} \varepsilon_f (\varepsilon_f + \tilde{\varepsilon}_{crk})$$

より、

$$\tilde{\varepsilon}_{crk} = -\frac{\varepsilon_f}{2} \quad (2.1.99)$$

と求まる。(2.1.99)式の両辺に  $r_{po}$  を掛けると、

$$\tilde{\delta}_{crk} = \frac{\delta_f}{2} \quad (2.1.100)$$

となる。(2.1.96)式に、(2.1.92)式、(2.1.100)式を代入すると、

$$\delta_f = \frac{E_c(r_{co} - r_{ci})}{E_c(r_{co} - r_{ci}) + \frac{\delta_f}{2\tilde{\delta}_{crk}} Er_{ci}} \left( \delta_{fc} - \frac{\delta_f}{2} \right) + \frac{\delta_f}{2} \quad (2.1.101)$$

となる。これを  $\delta_f$  について整理すると、

$$Er_{ci} \delta_f^2 + 4\delta_{crk} E_c (r_{co} - r_{ci}) \delta_f - 4\delta_{crk} E_c (r_{co} - r_{ci}) \delta_{fc} = 0$$

となるので、 $\delta_f (> 0)$  について解くと、

$$\delta_f = \frac{-2\delta_{crk} E_c (r_{co} - r_{ci}) + \sqrt{4\delta_{crk}^2 E_c^2 (r_{co} - r_{ci})^2 + 4\delta_{crk} E_c r_{ci} (r_{co} - r_{ci}) \delta_{fc}}}{Er_{ci}} \quad (2.1.102)$$

となる。(2.1.102)式を(2.1.92)式および(2.1.100)式に代入すると、 $E_f$  および  $\tilde{\delta}_{crk}$  が求められる。

以上により  $\delta_c$  について整理すると、

$$\delta_c = \begin{cases} \frac{E_f r_{ci}}{E_c (r_{co} - r_{ci}) + E_f r_{ci}} \left( \delta_{fc} - \frac{\delta_f}{2} \right) & \left( 0 \leq \delta_{fc} < 2\delta_{crk} + \frac{Er_{ci}}{E_c (r_{co} - r_{ci})} \delta_{crk} \right) \\ \frac{E r_{ci}}{E (r_{co} - r_{ci}) + Er_{ci}} (\delta_{fc} - \delta_{crk}) & \left( 2\delta_{crk} + \frac{Er_{ci}}{E_c (r_{co} - r_{ci})} \delta_{crk} \leq \delta_{fc} \right) \end{cases} \quad (2.1.103)$$

となる。 $\delta_f$  は(2.1.101)式により既知、したがって、接触力は(2.1.89)式に、(2.1.103)式で決定された  $\delta_c$  を代入して求められる。

また、接触力は、被覆管が降伏した後は、降伏したときの接触力の値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  $\sigma_y$  以上になった場合は、(2.1.65)式の代わ

りに、

$$\bar{\sigma} = \sigma_y$$

とする。ここで被覆管の  $\sigma_y$  は、再結晶焼鉄材に対しては、次式を用いる<sup>(1)</sup>。

$$\sigma_y = 21.60 - 0.0213 \times T + \Delta\sigma_{yo}^{irr} \quad (2.1.104)$$

ただし

$$\sigma_y : 0.2\% \text{ 耐力 } (\text{kg/mm}^2)$$

$$T : \text{ 温度 } (\text{°C})$$

である。

応力除去材に対しては次式を用いる<sup>(1)</sup>。

$$\sigma_y = 31.32 - 0.0213 \times T + \Delta\sigma_{yo}^{irr} \quad (2.1.105)$$

照射硬化による降伏応力の増加  $\Delta\sigma_{yo}^{irr}$  は次式を用いる<sup>(1)</sup>。

$$\Delta\sigma_{yo}^{irr} = 33.4 [1 - \exp(-c\phi t)]^{\frac{1}{2}} \quad (2.1.106)$$

ここで、

$$c : 2.92 \times 10^{-21} \exp(-1.6 \times 10^{-14} \phi)$$

$$\phi : \text{ 高速中性子束 } (\text{n/cm}^2 \cdot \text{s})$$

$$t : \text{ 時間 } (\text{s})$$

である。

## 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 10 領域に分割し、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、機構論的モデルと温度領域モデルおよびシンプルな燃焼度履歴依存モデルのいづれかを選択できる。

オプション選択 IGASP

IGASP = 1: 温度領域モデル、  
= 2: 燃焼履歴依存モデル

### (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。

$$P^{ij} = \frac{Y \cdot f^{ij} \cdot q^j}{E_f \cdot N_A} \quad (2.1.107)$$

ここで、

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

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

$\phi(r)$  : 径方向発熱密度分布関数、(2.1.32)式

$q^j$  : 軸方向セグメント  $j$  の平均発熱密度(W/cm)

$$= \frac{P_{LHR}^j}{\pi(1-h^2)}$$

$P_{LHR}^j$  : 軸方向セグメント  $j$  の線出力(W/cm)

$h$  : 中心孔規格化半径 (—)

$E_f$  : 1 fission 当りに発生するエネルギー、 $3.204 \times 10^{-11}$  joule (=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、 $6.02 \times 10^{23}$

である。

### (2) FPガス放出モデル(機構論的モデル)

#### (2)-1 放出機構の仮定

まず、粒内で生成されたガスは次の 2 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・アトムの粒内拡散
- 2) UO<sub>2</sub> 粒成長による粒界への掃き出し

粒界のバブル中での FP ガス蓄積量がある飽和量に達すると、複数のバブルが連結し、ペレット自由表面へのトンネルが形成されると仮定する。トンネルが形成された状態では、粒内より粒界へ拡散してくる追加のガスはトンネルへ入り、ペレット自由表面へ直ちに放出される。なお、粒内ガス解析では、ガスの粒内バブルへのトラッピングあるいは、粒内バブル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と仮定する。

## (2)-2 トラッピングを伴う拡散

図 2.23(1)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、図 2.23(2)に理想化された結晶粒モデルを示す。

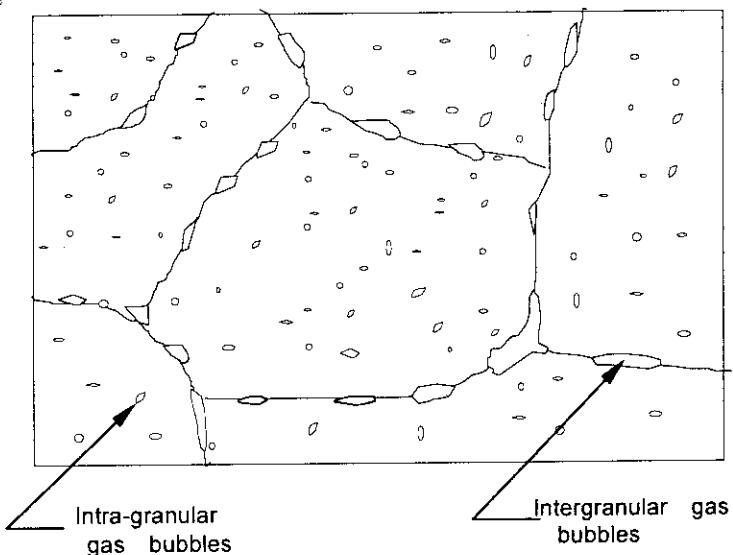


図 2.23(1) ペレット粒内ガス気泡と粒界ガス気泡の状態の模式図

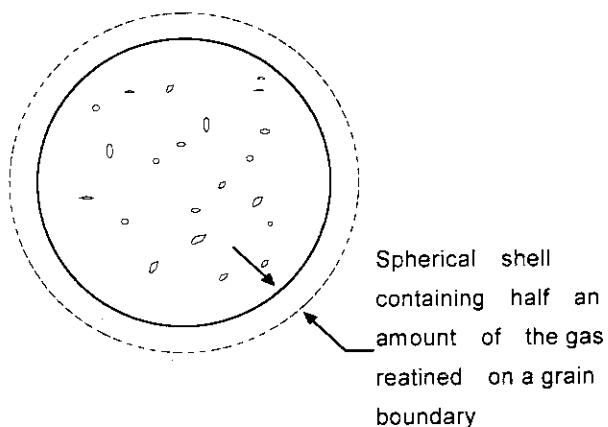


図 2.23(2) ペレット結晶粒理想化モデル

図 2.23(2)の粒界は粒界バブルの球殻ブランケットで覆われているように描かれているが、実際の粒界は隣り合った結晶粒を分離する薄い膜状組織である。

固体内部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、トラッピングと再溶解の平

衡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  $a$  の球形固体マトリックス内におけるガスの拡散は、トラッピングと再溶解を考慮した場合次式で表される<sup>(27)</sup>。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial c}{\partial r} \right) - gc + b'm + \beta \quad (2.1.108)$$

ここで、

$c$  : 単位体積あたり固体マトリックス内に溶解している  
ガス原子数 ( $\text{atoms/cm}^3$ )

$D$  : ガス原子の拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )

$g$  : 粒内バブルにトラップされるガスの割合 ( $\text{s}^{-1}$ )

$b'$  : 固体内への再溶解率 ( $\text{s}^{-1}$ )

$m$  : バブルの空間単位体積あたりに存在するガス原子数( $\text{atoms/cm}^3$ )

$\beta$  : ペレット単位体積あたりのガスの生成率 ( $\text{atoms/cm}^3/\text{s}$ )

である。

粒内バブルにトラップされたガスの再溶解との平衡は次式で表される。

$$\frac{\partial m}{\partial t} = gc - b'm \quad (2.1.109)$$

平衡状態において、 $m$  の時間変化が無視されるとき、(2.1.109)式は、

$$gc = b'm \quad (2.1.110)$$

と簡略化される。そこで(2.1.108)式および(2.1.109)式を辺々加えると、

$$\frac{\partial(c+m)}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2(c+m)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial(c+m)}{\partial r} \right) + \beta \quad (2.1.111)$$

となる。ここで(2.1.110)式より、

$$c+m = \frac{b'+g}{b'} c \quad (2.1.112)$$

の関係が得られる。これを(2.1.111)式に代入すると、

$$\frac{\partial(c+m)}{\partial t} = \frac{Db'}{b'+g} \left( \frac{\partial^2(c+m)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial(c+m)}{\partial r} \right) + \beta \quad (2.1.113)$$

を得る。ここで、固体マトリックス内および粒内バブル内のガス原子数の和を

$$\Psi = c + m \quad (2.1.114)$$

で表すと、トラッピングを伴う粒内での球座標系の拡散方程式は最終的に次のように表される。

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = +D' \left( \frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right) + \beta \quad (2.1.115)$$

ここで

$$D' = \frac{b'D}{b'+g} \quad (2.1.116)$$

である。 $\Psi$ はガスが固相に存在するか、粒内バブル内に存在するかに關係なく、粒内のみかけの単位体積あたりの平均ガス原子数を表す。

$D'$ 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。

次に(2.1.115)式を解くために、 $g$ および $b'$ を求める。まず、単位体積あたりに半径 $\bar{R}$ 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、 $\bar{R}$ と $N$ の間には次の関係が成立している<sup>(28)</sup>。

$$N = 1.52\alpha / \pi\lambda(\bar{R} + Z_o)^2 \quad (2.1.117)$$

ここで、

$N$  : 粒内気泡密度 (*bubbles/cm<sup>3</sup>*)

$\bar{R}$  : 粒内気泡平均半径 (cm)

$Z_o$  : 核分裂の影響範囲(cm)

$\alpha$  : 気泡の生成率 (= 24 bubbles/fission fragment)

$\lambda$  : 飛程 (=  $6 \times 10^{-4}$  cm)

である。

### 調整パラメータ APORE

核分裂の影響範囲 $Z_o$ は入力パラメータ APORE で与えられる。標準値は 0.0(cm)である。

粒内バブルへのトラッピング率 $g$ は次式で与えられる<sup>(29)</sup>。

$$g = 4\pi D\bar{R}N, \quad (2.1.118)$$

$\bar{R}$  : 粒内バブル平均半径 (cm),

$N$  : 粒内バブル数密度 (*bubbles/cm<sup>3</sup>*) .

なお、(2.1.118)式中のバブル数密度 $N$ は(2.1.117)により求められる。

固相への再溶解率は次式で与えられる<sup>(28)</sup>。

$$b' = 3.03F\pi\lambda(\bar{R} + Z_0)^2 \quad (2.1.119)$$

ここで、

$F$ : 核分裂速度(fissions/cm<sup>3</sup>/sec)

$\lambda$ : 飛程 (=6×10<sup>-4</sup> cm)

$Z_0$ : 影響範囲(cm)

調整パラメータ BFCT

固相への再溶解率は BFACT により調整できる。

$b' = b' \times BFCT$  (標準値 1.0)

である。

粒内気泡平均半径  $\bar{R}$  はファン・デル・ワールスの状態方程式により求める。ファン・デル・ワールスの状態方程式を

$$\left( P_0 + \frac{2\gamma}{\bar{R}} \right) (V - m^* B) = m^* kT \quad (2.1.120)$$

と書く。ここで、

$\bar{R}$ : 粒内気泡平均半径(cm)

$P_0$ : 粒内気泡に加わる外力(dyn/cm<sup>2</sup>)

$\gamma$ : 表面張力(626 erg/cm<sup>2</sup>)

$V$ : 粒内気泡体積(=  $\frac{4}{3}\pi\bar{R}^3$  cm<sup>3</sup>)

$B$ : ファン・デル・ワールス定数(= 8.5×10<sup>-23</sup> cm<sup>3</sup>/atom)

$m^*$ : 1 気泡当たりのガス原子数(atoms/bubble)

$k$ : ボルツマン定数(= 1.38×10<sup>-16</sup> erg/K)

$T$ : 温度(T)

である。

$\bar{R}$  は 1nm 以下と非常に小さいため  $2\gamma/\bar{R} \gg P_0$  であり、 $P_0$  は無視できる。 $P_0=0$  とおいて (2.1.120)式を  $m^*$ について解けば

$$m^* = \frac{8\pi\gamma\bar{R}}{3(2\gamma B + kT\bar{R})} \quad (2.1.121)$$

となる。(2.1.121)式右辺の分母をみると、 $2\gamma B$  に比べて  $kT\bar{R}$  は小さいので、 $kT\bar{R}$  を無視すれば、

$$m^* = \frac{4\pi\gamma\bar{R}}{3B} \quad (2.1.122)$$

を得る。

一方、トラップと再溶解の平衡関係式(2.1.110)式、

$$gc = b'm \quad (2.1.110)$$

を、関係式  $m=m^*N$ 、 $c=\Psi-m$  により  $m^*$ を用いた式に書き換えると

$$(b'+g)m^*N = g\Psi \quad (2.1.123)$$

となる。(2.1.123)式に(2.1.118)、(2.1.119)、(2.1.122)式を代入すると、

$$\left(3.03F\pi\lambda(\bar{R}+Z_0)^2 + 4\pi D\bar{R}N\right)\frac{\bar{R}^2}{3B} = D\Psi \quad (2.1.124)$$

となる。さらに(2.1.116)式を代入し、整理することにより  $\bar{R}$  についての方程式、

$$\frac{3.03F\pi\lambda(\bar{R}+Z_0)^2\bar{R}^2}{3B} + \frac{4D \cdot 1.52\alpha\bar{R}^3}{3B\lambda(\bar{R}+Z_0)^2} = D\Psi \quad (2.1.125)$$

を得る。

拡散係数  $D$  は Turnbull により次式で与えられている<sup>(30)</sup>。

$$D = 7.6 \times 10^{-10} \exp(-7 \times 10^4 / RT) + S^2 jvV + 2 \times 10^{-40} F \quad (m^2 / s) \quad (2.1.126)$$

ここで

$$R : ガス定数 = 1.987 \text{ cal/mole/K}$$

$$T : 温度 (K)$$

$$S : 原子ジャンプ距離 = \Omega^{\frac{2}{3}}$$

$$\Omega : 原子容積 = 4.09 \times 10^{-29} \quad (m^3)$$

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

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

$$\partial_s = 10^{15} \quad (m^{-2}, \text{シンク強度})$$

$$Z = 2 \quad (\text{欠損点数})$$

$$K' = 10^4 \quad (\text{原子当りの欠損率})$$

$$V_o = \exp(-5.52 \times 10^4 / RT)$$

$$F = 10^{19} \left( fission / m^3 / s \right) (\text{核分裂速度})$$

調整パラメータ FACD

拡散係数は FACD により調整できる。

$$D = D \times FACD \quad (\text{標準値 } 1.0)$$

である。

拡散係数の温度依存性を図 2.24 に示す。

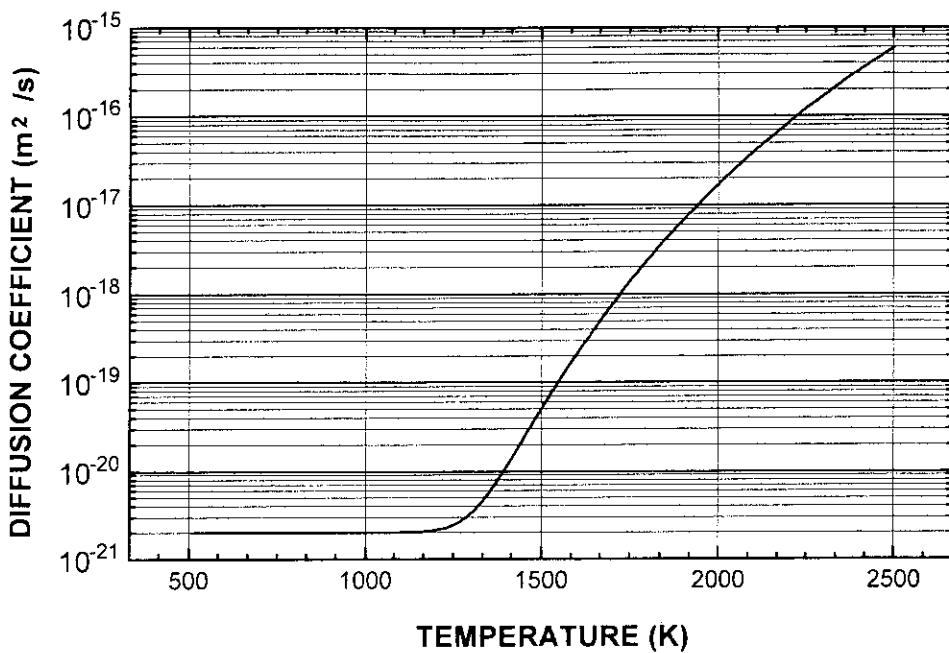


図 2.24 FP 原子の拡散係数

## (2)-3 偏微分方程式の解法

偏微分方程式(2.1.115)の解法には、有限要素法を用い、要素内において、Galerkin の重み付き残差法により定式化する。

(2.1.115)式を、

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} - D' \nabla^2 \Psi - \beta = 0 \quad (2.1.127)$$

と書く。ここで関数  $\Psi(t, r)$  の近似関数を次式のように置く。

$$\Psi(t, r) \approx \hat{\Psi}(t, r) = \sum_j \Psi_j(t) \phi_j(r)$$

ここで  $\phi_j(r)$  は基本関数と呼ばれる任意の既知関数であり、 $\Psi_j$  は未知係数である。このとき残差は、

$$R_\Psi(t, r) = \frac{\partial \hat{\Psi}}{\partial t} - D' \nabla^2 \hat{\Psi} - \beta$$

である。この残差が最小となるような係数  $\{\Psi_j\}$  を決定する。係数  $\{\Psi_j\}$  は重みをかけた積分がゼロになることを要請することで決定できる。重み関数として基本関数を選べば、この要請は次式で与えられる。

$$\int_V R_\Psi(t, r) \phi_i dv = 0 \quad (2.1.128)$$

(2.1.128)式は、任意の重み関数  $\phi_j$  に対して満足するためには、 $R\Psi(t, r)=0$  であることが必要であるので(2.1.117)式と等価である。(2.1.128)式の積分を行うと、

$$\begin{aligned} & \int_V \left( \frac{\partial \hat{\Psi}}{\partial t} - D' \nabla^2 \hat{\Psi} - \beta \right) \phi_i dv = 0 \\ & \int_V \left( \frac{\partial \hat{\Psi}}{\partial t} - \beta \right) \phi_i dv - \int_V D' \nabla^2 \hat{\Psi} \phi_i dv = 0 \end{aligned} \quad (2.1.129)$$

(2.1.129)式の第2項は、

$$\begin{aligned} - \int_V D' \nabla^2 \hat{\Psi} \phi_i dv &= -D' \left[ \int_V \nabla \cdot (\phi_i \nabla \hat{\Psi}) dv - \int_V (\nabla \hat{\Psi}) \cdot (\nabla \phi_i) dv \right] \\ &= -D' \int_{\partial V} \phi_i \nabla \hat{\Psi} \cdot d\vec{s} + D' \int_V (\nabla \hat{\Psi}) \cdot (\nabla \phi_i) dv \end{aligned}$$

と書ける。ここで、重み関数として粒境界  $\partial V$  上で  $\phi_j=0$  になるもののみを選べば、表面積分項は消えて、(2.1.129)式は、

$$\int_V \left( \frac{\partial \hat{\Psi}}{\partial t} - \beta \right) \phi_i dv + D' \int_V (\nabla \hat{\Psi}) \cdot (\nabla \phi_i) dv = 0 \quad (2.1.130)$$

となる。ペレットの結晶粒内を有限要素に分割すると、ある要素  $V_e$  についての(2.1.130)式の積分は、

$$\sum_j (\hat{\Psi}_j E_{ji} + D' \Psi_j A_{ji}) - \beta H_i = 0 \quad (2.1.131)$$

となる。ここで、

$$\begin{aligned} E_{ji} &= \int_{V_e} \phi_j \phi_i dv \\ A_{ji} &= \int_{V_e} \frac{\partial \phi_j}{\partial \sigma} \frac{\partial \phi_i}{\partial \sigma} dv \\ H_i &= \int_{V_e} \phi_i dv \end{aligned}$$

である。

基本関数  $\phi_j$  として、次の二次関数を用いる。

$$\begin{aligned} \phi_1(\xi) &= -\frac{1}{2}\xi(1-\xi) \\ \phi_2(\xi) &= 1-\xi^2 \\ \phi_3(\xi) &= \frac{1}{2}\xi(1+\xi) \end{aligned} \quad (2.1.132)$$

(2.1.131)中での  $E_{ji}$ ,  $A_{ji}$ ,  $H_i$  は、要素  $k$  (中点座標を  $R_k$ , 要素幅の  $1/2$  を  $\Delta R$  とする) の場合について求めると、

$$\begin{aligned} E_{ji} &= \int_{r_e} \phi_j \phi_i dv = 4\pi \int_{R_k - \Delta R}^{R_k + \Delta R} \phi_j \phi_i r^2 dr \\ &= 4\pi \Delta R \int_1 \phi_j \phi_i (R_k + \Delta R \xi)^2 d\xi \\ A_{ji} &= \int_r \frac{\partial \phi_i}{\partial r} \frac{\partial \phi_j}{\partial r} dv = 4\pi \int_{R_k - \Delta R}^{R_k + \Delta R} \frac{\partial \phi_i}{\partial r} \frac{\partial \phi_j}{\partial r} r^2 dr \\ &= \frac{4\pi}{\Delta R} \int_1 \frac{\partial \phi_i}{\partial \xi} \frac{\partial \phi_j}{\partial \xi} (R_k + \Delta R \xi)^2 d\xi \\ H_i &= \int_r \phi_i dv = 4\pi \int_{R_k - \Delta R}^{R_k + \Delta R} \phi_i r^2 dr = 4\pi \Delta R \int_1 \phi_i (R_k + \Delta R \xi)^2 d\xi \end{aligned} \quad (2.1.133)$$

である。

次に、(2.1.131)式を陰解法形式で表すと、( $Q$ は定数)

$$\sum_j \left\{ \frac{\Psi_j^{n+1} - \Psi_j^n}{\Delta t} E_{ij} + D^* ((1-\theta)\Psi_j^n + \theta\Psi_j^{n+1}) A_{ji} \right\} - \beta^* H_i = 0 \quad (2.1.134)$$

ここで、

$$\begin{aligned} D^* &= (1-\theta)D'^n + \theta D'^{n+1} \\ \beta^* &= (1-\theta)\beta^n + \theta\beta^{n+1} \end{aligned}$$

(2.1.134)式について未知数と既知数を整理すれば、

$$\sum_j \left( \frac{1}{\Delta t} E_{ij} + D^* \theta A_{ji} \right) \Psi_j^{n+1} = \sum_j \left( \frac{1}{\Delta t} E_{ij} - D^* (1-\theta) A_{ji} \right) \Psi_j^n + \beta^* H_i \quad (2.1.135)$$

したがって要素マトリクス  $W_{ij}$ , 要素ベクトル  $Q_i$  は

$$\begin{aligned} W_{ij} &= \frac{1}{\Delta k} E_{ij} + D^* \theta A_{ji} \\ Q_i &= \sum_j \left( \frac{1}{\Delta t} E_{ij} - D^* (1-\theta) A_{ji} \right) \Psi_j^n + \beta^* H_i \end{aligned}$$

である。

全要素について重ね合わせ、表面における  $\Psi_j^{n+1} = 0$  の条件を与えて、

$$[W_{ij}] \{ \Psi_j^{n+1} \} = \{ Q_i \} \quad (2.1.136)$$

の連立方程式を解けば  $\{ \Psi_j^{n+1} \}$  を求めることができる。

## (2)-4 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は次式で表される。

$$f_g = \left( \frac{a^{n+1}}{a^n} \right)^3 - 1 \quad (2.1.137)$$

ここで、

$a^{n+1}$  : 粒成長後の結晶粒半径 (cm)

$a^n$  : 粒成長前の結晶粒半径 (cm)

である。

調整パラメータ FGG

掃き出されるガスの割合は FGG により、 $f_g = f_g \times FGG$  のように調整される。

図 2.25 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。

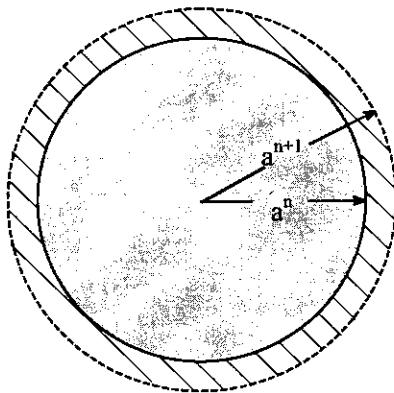


図 2.25 粒成長概念図

粒成長モデルとしては、以下の Itoh らのモデル<sup>(31)</sup>を (Ainscough モデル<sup>(32)</sup>の修正式として) 標準的に用いる。

$$\frac{da}{dt} = K \left( \frac{1 + N_f / N_f^{\max}}{a_m} \right) \quad (\mu m/h), \quad (2.1.138)$$

$$K = 5.24 \times 10^7 \exp(-2.67 \times 10^5 / RT) \quad (\mu m^2/h),$$

$a$  : 現ステップでの粒径 ( $\mu m$ ),

$a_m$  : 最大限界粒径 ( $= 2.23 \times 10^3 \exp(-7620 / T)$ ) ( $\mu m$ ),

$R$  : ガス定数 ( $= 8.314 J/mol/K$ ),

$N_f$  : 粒界でのガス原子密度 ( $atoms/cm^2$ ),

$N_f^{\max}$  : 粒界でのガス原子密度の飽和値 ( $atoms/cm^2$ ).

## 調整パラメータ AG、GRWF

粒成長速度は次のように調整することが出来る。

$$1) \text{原子数密度の調整 } N_f = N_f \times AG \quad (\text{標準値 } AG=1.5)$$

$$2) \text{粒成長速度} \quad \frac{da}{dt} = \frac{da}{dt} \times GRWF \quad (\text{標準値 } GRWF=1.0)$$

## オプション選択 IGRAIN

粒成長モデルオプションは IGRAIN により次のように選択される。

IGRAIN=0:Itoh モデル(標準)、=1:Ainscough モデル、=2:MacEwan モデル  
=3:Lyons モデル、=4:MATPRO-09 モデル

粒内要素は最大 5 要素まで構成され、最外層要素は境界層として再溶解を考慮するための特別な要素とする。また、粒成長が起こった場合には、粒内のメッシュについてリメッシュを行う。

境界層幅を  $2\Delta R$  とすると、第 1 層、第 2 層の要素

内のノードの座標  $r$  は、

$$r^{n+1} = \frac{a^{n+1} - 2\Delta R}{a^n - 2\Delta R} r^n \quad (2.1.139)$$

とする。ここで、

$r^{n+1}$  : 粒成長後のメッシュ点座標

$r^n$  : 粒成長前のメッシュ点座標

である。また、最外層（境界層）の要素内

メッシュ点座標は、それぞれ  $a^{n+1} - 2\Delta R$ 、

$a^{n+1} - \Delta R$ 、 $a^{n+1}$  として与える。

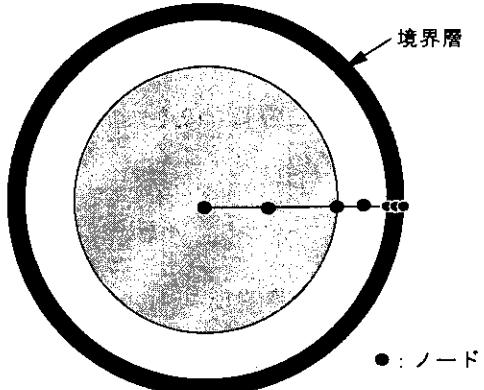


図 2.26 ペレット結晶粒内有限要素メッシュ

## モデルパラメータ NODEG,RREL

粒内要素数は NODEG により指定できる。標準値は 3、最大値は 5 である。

最外層以外、すなわち NODEG-1 の要素に対する要素幅は RREL によりその比を指定する。標準値は 5, 1, である。

これは第 1 層と第 2 層の要素幅の比が 5:1 であることを意味する。

このときリメッシュされた新しい座標での FP ガス濃度  $\Psi$  については、

$$\Psi^{n+1,0}(r) = \Psi^n(r) \quad (0 \leq r \leq a^n) \quad (2.1.140)$$

$$\Psi^{n+1,0}(r) = 0 \quad (a^n \leq r \leq a^{n+1})$$

とする。ここで、

$\Psi^{n+1,0}(r)$  : 粒成長後の FP ガス濃度の初期分布

$\Psi^n(r)$  : 粒成長前の FP ガス濃度分布

である。すなわち、粒成長による粒界への掃き出しが瞬時に起こると仮定する。したがって、粒成長が起こった時の粒界での単位面積当たりのFPガス原子数濃度のタイムステップ  $n \rightarrow n+1$  の変化を計算するときの初期値を  $N_f^{n+1,0}$  とすると、次式の関係が成り立つ。

$$\left(\frac{a^{n+1}}{a^n}\right)^3 \left(\bar{\Psi}_{total}^n + 4\pi a^{n^2} N_f^n\right) = \bar{\Psi}_{total}^n + 4\pi a^{(n+1)^2} N_f^{n+1,0} \quad (2.1.141)$$

ここで、

$\bar{\Psi}_{total}^n$  : 粒成長前の結晶粒内のFPガス原子数 (atoms)

$N_f^n$  : 粒界での単位面積当たりの、粒成長以前のFPガス原子数濃度  
(atoms/cm<sup>2</sup>)

である。(2.1.137)式を  $N_f^{n+1,0}$  について解くと、

$$N_f^{n+1,0} = \frac{f_g \bar{\Psi}_{total}^n}{4\pi a^{(n+1)^2}} + \frac{a^{n+1}}{a^n} N_f^n \quad (2.1.142)$$

となる。こうしてタイムステップ  $n+1$  のFPガスの粒内および粒界濃度を決定するための、初期値が求められた。この値と(2.1.135)式を用い、粒成長したときの  $n+1$  タイムステップでの濃度計算を行う。

## (2)-5 FPガスの再溶解

粒界から粒内への再溶解の取り扱いでは、粒界は隣合った結晶粒を分離するため、粒界の単位面積当たりにとどまっているガス量の半分のFPガスが再溶解すると仮定する。

すなわち、再溶解する量は

$$\frac{bN_f}{2} \cdot (ADDF) \quad (\text{atoms}/\text{cm}^2/\text{s}) \quad (2.1.143)$$

ここで、

$b$  : 再溶解率 ( $10^{-6}/\text{s}$ )

である。再溶解は粒界から粒内へFPガスが移行するのであるが、粒内からみればFPガスが生成したのと同じである。このため、FPガス原子が再溶解する厚みを境界層 (200Å) とすれば、境界層におけるみかけのFPガス生成率  $\beta'$  を与えることで再溶解をモデル化できる。

調整パラメータ ADDF

再溶解するガスの量は  
ADDFにより調整できる。標準値は9.0。

モデルパラメータ RB

FPガス原子が再溶解する厚みの境界層をコントロールするパラメータである。

RBは境界層の厚みを指定する。標準値は  $2 \times 10^{-8}\text{cm}$  である。

そこで、 $\beta'$  を以下のように与える。

$$\beta' = \frac{b}{2} \left\{ (1 - \theta) N_f^n + \theta N_f^{n+1} \right\} \frac{1}{2\Delta R} (ADD) \quad (\text{atoms/cm}^3/\text{s}) \quad (2.1.144)$$

したがって、(2.1.108)式中の $\beta$ は境界層においては、

$$\tilde{\beta} = \beta + \beta' \quad (2.1.145)$$

として、 $\tilde{\beta}$ をFPガス生成率とする。

$N_f^{n+1}$ については、

$$N_f^{n+1} = \frac{a^{n+1}}{a^n} N_f^n + \frac{(1 + f_g) \bar{\Psi}_{total}^n - \bar{\Psi}_{total}^{n+1} + \int_V \beta \Delta t dV}{4\pi a^{n+1}} \quad (2.1.146)$$

で与える。ここで、

$\bar{\Psi}_{total}^{n+1}$  : タイムステップ後の結晶粒内のFPガス原子数 (atoms)

$\beta \Delta t dV$  : 再溶解分を含まないタイムステップ間でのFPガス生成量 (atoms)  
である。ただし、 $\int_V dV = \frac{4}{3}\pi a^{n+1}$  である。

なお、 $\bar{\Psi}_{total}^{n+1}$ は、粒内容素数が3要素のとき、

$$\bar{\Psi}_{total}^{n+1} = \sum_{e=1}^3 \int_e 4\pi r^2 \hat{\Psi}^{n+1}(r) dr, \quad (2.1.147)$$

$$\hat{\Psi}^{n+1}(r) = \sum_{j=1}^3 \Psi_j^{n+1} \phi_j(r)$$

である。

## (2) - 6 粒界バブルの連結によるガス放出

照射が進むにつれ、粒界でバブル密度が高くなり、バブルが粗大化すると、バブルは広範囲にわたって連結する。そして連結バブル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、バブルは開気孔となり、バブル内のガスは燃料棒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飽和値 $N_f^{max}$ を超えると、それまで孤立していたバブル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原子は直ちに自由空間に放出されると仮定する。

なお、 $N_f^{max}$ は次式により与えられる<sup>(28)</sup>。

$$N_f^{\max} = \frac{4r_f f_f(\vartheta)}{3kT \sin^2 \vartheta} f_b \left\{ \frac{2\gamma}{r_f} + P_{ext} \right\} \quad (2.1.1488)$$

ここで、

$N_f^{\max}$  : 粒界での単位面積あたりのガス原子数の飽和値 ( $\text{atoms}/\text{cm}^2$ )

$$f_f(\vartheta) = 1 - \frac{3}{2} \cos \vartheta + \frac{1}{2} \cos^3 \vartheta$$

$r_f$  : 粒界でのガスバブルの半径 ( $=0.5 \times 10^{-4} \text{ cm}$ )

$f_b$  : 球体積に対するレンズ状バブル体積比

$\vartheta$  : レンズ状バブル角 ( $=50^\circ$ )

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

$T$  : 温度 ( $^\circ \text{K}$ )

$\gamma$  : 表面張力 ( $=626 \text{ erg}/\text{cm}^2$ )

$f_b$  : レンズ状バブルが粒界を覆う割合 ( $=0.2$ 、固定値)

$P_{ext}$  : 外部からの圧力 ( $\text{dyne}/\text{cm}^2$ )

である。

外部圧力  $P_{ext}$  については、以下のようにしてプレナム圧、ペレット被覆管接触圧、およびペレット内熱応力を考慮して評価することができる。

ペレット内部の熱応力を求める場合、厳密には、熱的解析部における方法のようにペレット内温度分布の算出に有限要素法を適用するのが一般的である。しかし、この FP 放出モデルにおいては、解析解を利用して近似的な温度分布と熱応力を求める簡便な方法を用いる。すなわち、Lame の条件式を用い、ペレット内部の温度分布を

$$T - T_s = (T_c - T_s) \left\{ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right\} \quad (2.1.149)$$

ただし、  $T$  : 半径  $r$  の位置での温度

$T_s$  : ペレット表面温度

$T_c$  : ペレット中心温度

$R$  : ペレット外半径

とおく。するとペレット内熱応力は

$$\sigma_r = \frac{E}{4(1-\nu)} \alpha (T_c - T_s) \left\{ \left( \frac{r}{R} \right)^2 - 1 \right\} - P_i \quad (2.1.150)$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{4(1-\nu)} a(T_c - T_s) \left\{ 3 \left( \frac{r}{R} \right)^2 - 2 \right\} - P_i \quad (2.1.151)$$

$$\sigma_z = \frac{E}{4(1-\nu)} a(T_c - T_s) \left\{ 4 \left( \frac{r}{R} \right)^2 - 1 \right\} - P_i \quad (2.1.152)$$

となる。ここで

$\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z : r, \theta, z$  方向応力

$E$  : ペレットヤング率

$\nu$  : ペレットポアソン比

$a$  : ペレット熱膨張係数

$P_i$  : ペレット被覆管接触圧力

$P_f$  : ペレット軸力

である。

ただし  $P_i$  は熱計算で求められたペレット被覆管の接触圧力を用い、便宜上ペレットの軸力は接觸圧力に等しい ( $P_f = P_i$ ) とする。

平均応力  $\bar{\sigma}$  を、

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{3} (\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z) \quad (2.1.153)$$

とする。

以下、本コード中での熱応力の算出方法を示す。

第  $n$  ステップで応力  $\sigma_{r,n}, \sigma_{\theta,n}, \sigma_{z,n}$  が求められた後、第  $n+1$  ステップの応力  $\sigma_{r,n+1}, \sigma_{\theta,n+1}, \sigma_{z,n+1}$  を算出する方法を考える。ただし第 0 ステップ (hot stand-by) では  $\sigma_{r,0}, \sigma_{\theta,0}, \sigma_{z,0}$  はブレナムガス圧とする。

(2.1.150)、(2.1.151)、(2.1.152)式を用いてタイムステップ間での熱応力増分は

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{r,n+1}^{th} &= \frac{E_{n+1}}{4(1-\nu)} a_{n+1} (T_{c,n+1} - T_{s,n+1}) \left\{ \left( \frac{r}{R} \right)^2 - 1 \right\} - P_{i,n+1} \\ &\quad - \left\{ \frac{E_n}{4(1-\nu)} a_n (T_{c,n} - T_{s,n}) \left\{ \left( \frac{r}{R} \right)^2 - 1 \right\} - P_{i,n} \right\} \end{aligned} \quad (2.1.154)$$

$$\Delta\sigma_{\theta,n+1}^{th} = \frac{E_{n+1}}{4(1-\nu)} a_{n+1} (T_{c,n+1} - T_{s,n+1}) \left\{ \left( 3 \frac{r}{R} \right)^2 - 2 \right\} - P_{i,n+1} \\ - \left\{ \frac{E_n}{4(1-\nu)} a_n (T_{c,n} - T_{s,n}) \left\{ \left( 3 \frac{r}{R} \right)^2 - 2 \right\} - P_{i,n} \right\} \quad (2.1.155)$$

$$\Delta\sigma_{z,n+1}^{th} = \frac{E_{n+1}}{4(1-\nu)} a_{n+1} (T_{c,n+1} - T_{s,n+1}) \left\{ 4 \left( \frac{r}{R} \right)^2 - 1 \right\} - P_{i,n+1} \\ - \left\{ \frac{E_n}{4(1-\nu)} a_n (T_{c,n} - T_{s,n}) \left\{ 4 \left( \frac{r}{R} \right)^2 - 1 \right\} - P_{i,n} \right\} \quad (2.1.156)$$

と求められる。

第  $n+1$  ステップでの応力の第 0 近似値を

$$\sigma_{r,n+1}^0 = \sigma_{r,n} + \Delta\sigma_{r,n+1}^{th} \quad (2.1.157)$$

$$\sigma_{\theta,n+1}^0 = \sigma_{\theta,n} + \Delta\sigma_{\theta,n+1}^{th} \quad (2.1.158)$$

$$\sigma_{z,n+1}^0 = \sigma_{z,n} + \Delta\sigma_{z,n+1}^{th} \quad (2.1.159)$$

とおく。(2.1.157)、(2.1.158)、(2.1.159)式を(2.1.153)式に代入すれば平均応力の第 0 近似値  $\bar{\sigma}_{n+1}^0$  は

$$\bar{\sigma}_{n+1}^0 = \frac{1}{3} (\sigma_{r,n+1}^0 + \sigma_{\theta,n+1}^0 + \sigma_{z,n+1}^0) \quad (2.1.160)$$

である。ただし  $\bar{\sigma}_{n+1}^0$  がプレナムガス圧  $P_{gas}$  より小さい場合には

$$\bar{\sigma}_{n+1}^0 = P_{gas,n+1} \quad (2.1.161)$$

とする。また、 $\bar{\sigma}_{n+1}^0$  が降伏応力  $\sigma_Y$  より大きい場合には

$$\bar{\sigma}_{n+1}^0 = \sigma_{Y,n+1} \quad (2.1.162)$$

とおく。

次に相当応力  $\sigma_{eq}$  を  $\sigma_{eq} = \bar{\sigma}_{n+1}^0$  とおいてペレットのクリープ計算を行う。

応力緩和に寄与するペレット相当ひずみの変化は、クリープ速度関数  $f$  (MATPRO-09<sup>(23)</sup>) に比例すると仮定し、この比例定数を  $\eta$  とすると

$$\Delta\varepsilon_{n+1}^c = f(T, \sigma_{eq}, G, f_d, \dot{F}) \cdot \eta \cdot \Delta t \quad (2.1.163)$$

で与えられる。ここで

$T$  : 温度

$\sigma_{eq}$  : 相当応力

$G$  : 結晶粒サイズ

$f_d$  : ペレット理論密度比 $\dot{F}$  : 核分裂密度 $\Delta t$  : タイムステップ幅

である。ただし、比例定数は、実験データから求めたフィッティングパラメータとして  $\eta = 10^4$  を用いる。このようにして求めた  $\Delta \bar{\varepsilon}_{n+1}^c$  を用いて

$$\bar{\sigma}_{n+1}^1 = \bar{\sigma}_{n+1}^0 + E \Delta \bar{\varepsilon}_{n+1}^c \quad (2.1.164)$$

より平均応力の第1近似値  $\bar{\sigma}_{n+1}^1$  を求められる。ただし、クリープ変形における  $\sigma$  と  $\Delta \varepsilon$  の比例定数は、ヤング率  $E$  に線形依存すると仮定して、ヤング率  $E$  自体を用いる。以降ニュートン・ラブソン法を用いて  $\sigma_{n+1}$  について収束計算を行う。ただし  $-\sigma_{Y,n+1} \leq \bar{\sigma}_{n+1} \leq -P_{gas,n+1}$  とする。こうして求められた  $\bar{\sigma}_{n+1}$  が粒界気泡にかかる熱応力（外部圧力）、すなわち、(2.1.148)式における  $P_{ext}$  である。

第  $n+1$  ステップの応力  $\sigma_{r,n+1}$ 、 $\sigma_{\theta,n+1}$ 、 $\sigma_{z,n+1}$  は

$$\begin{aligned} \sigma_{r,n+1} &= \sigma_{r,n} + \Delta \sigma_{r,n+1}^{th} + E \Delta \bar{\varepsilon}_{n+1}^c \\ \sigma_{\theta,n+1} &= \sigma_{\theta,n} + \Delta \sigma_{\theta,n+1}^{th} + E \Delta \bar{\varepsilon}_{n+1}^c \\ \sigma_{z,n+1} &= \sigma_{z,n} + \Delta \sigma_{z,n+1}^{th} + E \Delta \bar{\varepsilon}_{n+1}^c \end{aligned} \quad (2.1.165)$$

として求められる。ここで、 $\sigma_{i,n+1} < 0$ 、すなわち、応力は圧縮応力であり、

$$\Delta \sigma_{i,n+1} \times \Delta Temp. < 0,$$

すなわち、応力の変化と温度変化とは、互いに異符号である。また(2.1.165)式は、次の  $n+2$  ステップに対する初期値として用いられる。

**オプション選択 IPEXT**  $P_{ext}$  の評価方法は、IPEXT により次の 8 つから選択できる。

- |               |  |                                     |
|---------------|--|-------------------------------------|
| 標準値は IPEXT=1。 | IPEXT=0: $P_{ext}=0$ ,                         | =1: $P_{ext}$ =プレナム圧、               |
|               | =2: $P_{ext}$ =ペレット被覆管間接触圧、                    | =3: $P_{ext}$ =max(プレナム圧、接触圧)、      |
|               | =11: $P_{ext}$ =熱応力(プレナム圧を考慮)、                 | =12: $P_{ext}$ =熱応力(ペレット被覆管間接触圧を考慮) |
|               | =13: $P_{ext}$ =熱応力(プレナム圧、接触圧を考慮)、             |                                     |
|               | =14: $P_{ext}$ =2.2 章の詳細な力学解析 A の応力計算で求めた平均応力。 |                                     |

## (2)-7 リム層からの FP ガスの放出

高燃焼時のペレットのリム層形成による FP ガスの非熱活性・追加的放出量を、以下のようなモデルにより計算する。注意すべきことは、この放出は通常の拡散による熱活性放出ではなく、燃焼度に依存する非熱活性放出であり、拡散による放出とは独立の追加的放出であることである。

リム層で生成された FP ガスのうち、リム形成により掃き出されるガスの割合を  $F_r$  とする。  
 $F_r$  の求め方は、以下の 2 オプションのいずれか一方を入力で指定する。

① Battelle モデル<sup>(15)</sup>

Battelle 高燃焼時諸効果研究計画で得られたモデルにおいては、FP ガスをキセノンで代表させ、次式で計算する。

$$F_r = 0.00625(B_u - 62.2), \quad B_u > 62.2 (\text{MWd/kgU}) \quad (2.1.166)$$

ただし、 $B_u$  はペレット端部（リム層）における局所燃焼度である。

また、燃焼度の伸長に伴うリム層領域の発達を燃焼度の関数として次式で与える。

$$W = 2.19(B_u - 48.8) \quad (2.1.167)$$

ここで、 $W$  はリム層厚み ( $\mu\text{m}$ ) である。さて(2.1.167)式から、リム層厚みはペレット端部燃焼度が 150MWd/kg-U にいたっても高々 220μm 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。

(2.1.166)、(2.1.167)式から、最外層領域において生成されたキセノンのうち、リム化によって放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。

$$R_r = V_r \cdot F_r \quad (2.1.168)$$

$$V_r = \pi \left\{ r_o^2 - (r_o - W)^2 \right\} / \pi (r_o^2 - r_i^2) \quad (2.1.169)$$

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。

なお、リム化による最外層領域での FP ガスの追加放出は、粒界バブルからなされると仮定して、粒成長したときの  $n+1$  タイムステップでの FP ガス原子の粒界濃度は、(2.1.146)式の代わりに次式を用いる。

$$N_f^{n+1} = \frac{a^{n+1}}{a^n} N_f^n + \frac{(1 + f_g) \bar{\Psi}_{total}^n - \bar{\Psi}_{total}^{n+1} + \int_V \beta \Delta t dv + (R_r^{n+1} M^{n+1} - R_r^n M^n)}{4\pi a^{n+1/2}} \quad (2.1.170)$$

ここで、

$M^{n+1}$  : 時刻  $t^{n+1}$  までに半径  $a^{n+1}$  の結晶粒で生成された FP ガス原子数 (atoms)

$M^n$  : 時刻  $t^n$  までに半径  $a^{n+1}$  の結晶粒で生成された FP ガス原子数 (atoms)

$R_r^{n+1}$  : 時刻  $t^{n+1}$  でのリム化による FP ガス放出率

$R_r^n$  : 時刻  $t^n$  でのリム化による FP ガス放出率

である。

② Cunningham モデル<sup>(33)</sup>

Cunninghamによれば、やはり FP ガスをキセノンで代表させ、次式によって追加的放出量を計算する。

$$R_r = F_r P_r \quad (2.1.171)$$

ここで、 $R_r$ ：リム領域から放出されたFPガス量の、ペレット全体のFP生成量に対する比、

$F_r$ ：(リム層面積／ペレット面積) × (リム層FPガス放出量／リム層FP生成量)

$P_r$ ：リム領域の平均燃焼度の、ペレット全体の平均燃焼度に対する比 (=1.3)

である。また、

$$F_r = 7.90 \times 10^{-3} - 6.98 \times 10^{-4} \cdot B_u + 8.34 \times 10^{-6} \cdot B_u^2 \quad (B_u > 65 \text{MWd/kgU}) \quad (2.1.172)$$

とする。ただし、 $B_u$ はペレット端部（リム領域）における局所燃焼度である。こうして、追加放出量が、全体のFP生成量に対する比として求められる。

**調整パラメータ RFGFAC** リム化によるFPガスの追加放出量は RFGFAC により調整できる。標準値は 1.0 である。  $F_r = F_r \times RFGFAC$

**オプション選択 IRIM** リム化によるFPガス追加放出のモデルは、次の 2 モデルから選択できる。 IRIM=1 : Battelle モデル（標準）、=2: Cunningham モデル。

## (2)-7 タイムステップ幅の決定

機構論的 FP ガス放出モデルでは、独自のタイムステップ幅を用いて計算を行っている。タイムステップ幅の決定には、見かけの拡散係数  $D'$  と第 2 層での節点間隔  $\Delta R_2$  を用いて、

$$\Delta t = \frac{\Delta R_2^2}{D'} \times 0.05 \times FMULT \quad (2.1.173)$$

として与えている。

**調整パラメータ FMULT** タイムステップ幅の調整パラメータ。標準値 1.0

## (3) FPガス放出モデル（燃焼履歴依存モデル）

温度依存の FP ガス放出モデルでは、独立変数としてペレット温度を用いる。しかしながら、ペレット温度自体は一般には正確に測定できず、コード検証用のデータとしては不十分である。そこで燃焼履歴依存モデルとして、内田のモデルをオプションに採用する<sup>(13)</sup>。内田のモデルで

は Booth のモデル<sup>(34)</sup>を修正し、燃焼度、線出力、ペレット結晶粒径等の、正確な測定の可能なデータによって FP 放出量を計算する。これは、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ある。

### (3) - 1 拡散モデルの式

ガスのペレット内拡散係数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。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -D \left( \frac{\partial^2 c}{\partial \xi^2} + \frac{2}{\xi} \frac{\partial c}{\partial \xi} \right) + S \quad (2.1.174)$$

ここで、

$t$  : 時間 (days)

$\xi$  : 等価球径方向座標 ( $\mu$  m)

$c$  : FP ガス濃度 (MWd/t-U)

$S$  : FP ガス生成率(W/g-U)

$D$  : 拡散係数 ( $\mu$  m<sup>2</sup>/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、その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係数を拡散項から取り除くために、有効時間  $\tau$  を導入して式を書き換える。拡散係数が時間の関数であるとして有効時間  $\tau$  を以下のように定義する。

$$\tau = \int_0^B \frac{D}{S} dB \quad \left( \because B(t) = \int_0^t S(t) dt \right) \quad (2.1.175)$$

$\tau$  を用いて(2.1.174)式を書き換えれば、

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = - \left( \frac{\partial^2 c}{\partial \xi^2} + \frac{2}{\xi} \frac{\partial c}{\partial \xi} \right) + \frac{S}{D} \quad (2.1.176)$$

となる。

### (3) - 2 FP ガス放出率

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。

(2.1.173)式で  $D=\text{const.}$ 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 (2.1.176)式の解をつくる。(2.1.176)式の右辺第1項は拡散係数が1の拡散項であるとみなせるので、Booth の解について、拡散係数を  $D=1$  とし、有効時間  $\tau$  で書き換えれば、(2.1.176)式の  $S/D=0$  のときの解として、

$$f(0,\tau) = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-4n^2\pi^2 \frac{\tau}{g^2}\right) \quad (2.1.177)$$

を得る。ここで  $g$  は等価球の直径 ( $\mu\text{m}$ ) である。

この式は、 $f(0,\tau)$  が小さいときは

$$f(0,\tau) = \frac{12}{g} \sqrt{\frac{\tau}{\pi}} - \frac{12\tau}{g^2} \quad (2.1.178)$$

と近似できる。実際(2.1.178)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、(2.1.176)式では拡散係数についての情報は  $\tau$  と右辺第2項が持っており、(2.1.177)式は、Booth の解の持っている本来の拡散係数が時間によらないという制限を受けない。

(2.1.177)式の右辺第2項を考慮して、重みをつけた重ね合わせの原理を用いれば、FP ガス放出率として、

$$F(0,\tau_f) = \frac{1}{B_f} \int_0^{\tau_f} \frac{S}{D}(\tau) f(\tau, \tau_f) d\tau \quad (2.1.179)$$

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

$$\frac{S}{D} = \frac{dB}{d\tau} \quad (2.1.180)$$

を用いて変数変換をすれば、結局、

$$F(0,\tau_f) = \frac{1}{B_f} \int_0^{\tau_f} f(0,\tau_f) dB = \frac{12}{g B_f} \int_0^{\tau_f} \left\{ \sqrt{\frac{\tau_f - \tau}{\pi}} - \frac{\tau_f - \tau}{g} \right\} dB \quad (2.1.181)$$

となる。

ところで  $\tau$  は、(2.1.175)式、あるいは(2.1.180)式を通じて、拡散係数  $D$  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、実際の拡散係数のふるまいを表す関数として  $\exp(x^2)$  型の関数を選び、

$$D = A_o q \exp\left\{\alpha B^2 - \beta(q_m q)^2\right\} \quad (\alpha, \beta > 0) \quad (2.1.182)$$

とおく。ここで、 $A_o, \alpha, \beta, q_m$  は、フィッティングパラメータであり、

$$A_o = 9.4 \times 10^{-4}, \alpha = 1.0 \times 10^{-9}, \beta = 5.33 \times 10^{-5}, q_m = 700$$

を使用する。

### (3)-3 中空(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

$$\int_{T_o}^{T_i} k \cdot dT = \frac{q}{4\pi} \quad (2.1.183)$$

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、

$$\int_{T_o}^{T_i} k \cdot dT = \frac{q}{4\pi} \left( 1 + \frac{2r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \ln \frac{r_i}{r_o} \right) \quad (2.1.184)$$

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

$$q' = q \left( 1 + \frac{2r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \ln \frac{r_i}{r_o} \right) \quad (2.1.185)$$

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(2.1.177)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

$$I_1 = \int_{r_1}^{r_1(0)} k dT = \frac{q' r_1^2}{4\pi r_o^2} \quad (2.1.186)$$

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  $r_1 < r < r_2$  にあるとすれば、同様の積分は

$$I_2 = \int_{r_1(0)}^{r_2(0)} k dT = \frac{q}{4\pi(r_o^2 - r_i^2)} \left( r_o^2 - r_i^2 + 2r_i \ln \frac{r_i}{r_2} \right) \quad (2.1.187)$$

となる。

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

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

と近似できる。(2.1.186)、(2.1.187)式から

$$\Delta r = \frac{r_i \sqrt{r_o^2 - r_i^2}}{r_o} \sqrt{\frac{q'}{q}}$$

と書くことができるので、放出領域の体積比は結局

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\pi(r_2^2 - r_i^2)}{\pi r_i^2} = \frac{2r_i \sqrt{r_o^2 - r_i^2}}{r_i r_o} \sqrt{\frac{q'}{q}} \quad (2.1.188)$$

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(2.1.177)式から、拡散方程式の解はおよそ拡散係数  $D$  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係数を  $(V_2 / V_1)^2$  倍することによって得ることができる。

パラメータ  $r_i$  を実験にあわせて  $r_i = r_1 / 2$  とおけば、必要な補正是拡散係数の(2.1.180)式中の定数  $A_o$  を

$$A'_o = A_o \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^2 = 16 A_o \frac{q'}{q} \left\{ 1 - \left( \frac{r_i}{r_o} \right)^2 \right\} \quad (2.1.189)$$

で置き換えることで得られる。

## 2.1.5 ギャップ内ガスの拡散・流動モデル

### (1) 拡散計算の仮定と方法

以下のような仮定および方法にもとづいてギャップ内のガスの拡散（流動）の計算を行う。

- ① ヘリウムと窒素（またはアルゴン）、キセノンとクリプトンはそれぞれ瞬時に完全混合するものと仮定する。窒素（またはアルゴン）の性質はヘリウムの性質の中に含め、クリプトンの性質はキセノンの性質の中に含めて考え、ヘリウムとキセノンのみの2成分系混合ガスについて計算を行う。
- ② ヘリウムとキセノンはギャップ部を通じて相互拡散するものとする。
- ③ 相互拡散の計算は 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ガス流動とは独立とする。
- ④ 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。
- ⑤ 燃料棒内の圧力平衡は瞬時に達成せられると仮定する。したがって、燃料棒内圧力差による軸方向セグメント間のガス流動も瞬時に起こる。

### (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<sup>3</sup>)

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

$T$  : 温度 (K)

$V$  : 体積 (m<sup>3</sup>)

$C$  : モル分率 ( $C_1 = n_1 / (n_1 + n_2)$ )

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 ( $j = P_L, 1, 2, 3, \dots, N, P_U$ )

( $P_L$  : 下部プレナム、 $P_U$  : 上部プレナム)

特にモル密度については、添え字を、

$n_{i,j}$  : 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 2.29 のようにモデル化することができる。

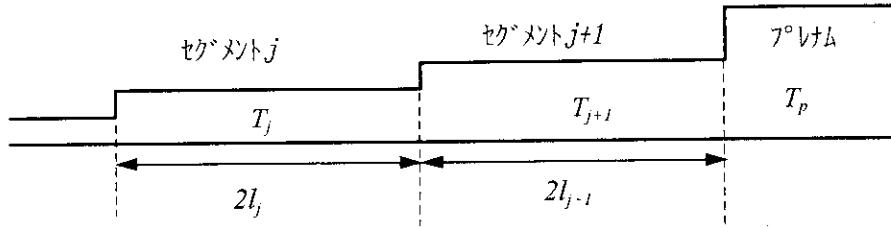


図 2.27 ガス拡散・流動モデル

セグメント  $j$  においてガス  $i$  の総量は

$$\begin{aligned} N_{i,j} &= n_{i,j} V_j \\ &= C_{i,j} n_j V_j = \frac{P}{R} C_{i,j} \frac{V_j}{T_j} \end{aligned} \quad (2.1.190)$$

である。

ここで各セグメントは流路断面積  $S_j$  をもち、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 I(Xe)の量  $G_i(j \rightarrow j+1)$  を求め る。 単位時間にセグメント  $j$  から \* を越えて流出するガス I(Xe)の量は、Fick の法則により、

$$G_i(j \rightarrow *) = S_j D_j^{12} \frac{n_{i,j} - n_{i,*}}{l_j} \quad (2.1.191)$$

と書ける。同様に、単位時間に \* を越えて  $j+1$  に流入するガス I(Xe)の量は、

$$G_i(*) \rightarrow j+1 = S_{j+1} D_{j+1}^{12} \frac{n_{i,*} - n_{i,j+1}}{l_{j+1}} \quad (2.1.192)$$

と書ける。連続性の条件により

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

が成り立つことから

$$S_j D_j^{12} \frac{n_{i,j} - n_{i,*}}{l_j} = S_{j+1} D_{j+1}^{12} \frac{n_{i,*} - n_{i,j+1}}{l_{j+1}} \quad (2.1.193)$$

を得る。これを  $n_{i,*}$  について解けば

$$n_{i,*} = \frac{S_j D_j^{12} l_{j+1} n_{i,j} + S_{j+1} D_{j+1}^{12} l_j n_{i,j+1}}{S_{j+1} D_{j+1}^{12} l_j + S_j D_j^{12} l_{j+1}} \quad (2.1.194)$$

となる。(2.1.191)式を用いることにより

$$\begin{aligned} G_1(j \rightarrow j+1) &= G_1(j \rightarrow *) \\ &= \frac{S_j D_j^{12} S_{j+1} D_{j+1}^{12}}{S_{j+1} D_{j+1}^{12} l_j + S_j D_j^{12} l_{j+1}} (n_{1,j} - n_{1,j+1}) \end{aligned} \quad (2.1.195)$$

を得る。ここで

$$F_{j,j+1} = \frac{S_j D_j^{12} S_{j+1} D_{j+1}^{12}}{S_{j+1} D_{j+1}^{12} l_j + S_j D_j^{12} l_{j+1}} \quad (2.1.196)$$

として

$$G_1(j \rightarrow j+1) = F_{j,j+1} (n_{1,j} - n_{1,j+1}) \quad (2.1.197)$$

の様に書く。

一方、ガス 2 (He) についても同様に

$$G_2(j \rightarrow j+1) = F_{j,j+1} (n_{2,j} - n_{2,j+1}) \quad (2.1.198)$$

を得る。

(2.1.197)式と(2.1.198)式を加えることにより混合ガス全体の流入量を得ることができる。

$$G(j \rightarrow j+1) = F_{j,j+1} (n_j - n_{j+1}) \quad (2.1.199)$$

ここで、

$$n_j = n_{1,j} + n_{2,j}, n_{j+1} = n_{1,j+1} + n_{2,j+1}$$

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

$$n_j \neq n_{j+1} \quad (2.1.200)$$

しかるに(2.1.199)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(2.1.197)式及び(2.1.198)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。

(2.1.199)式に加えるべき第 2 項は、

$$G(j \rightarrow j+1) = F_{j,j+1} \left\{ (n_j - n_{j+1}) - (\bar{n}_j - \bar{n}_{j+1}) \right\} \quad (2.1.201)$$

であり、 $\bar{n}_j, \bar{n}_{j+1}$  は理想気体の法則からそれぞれ

$$\bar{n}_j = \frac{P}{R} \frac{1}{T_j}, \bar{n}_{j+1} = \frac{P}{R} \frac{1}{T_{j+1}} \quad (2.1.202)$$

で与えられる。

各成分についての流量、(2.1.197)式及び(2.1.198)式はそれぞれ

$$G_1(j \rightarrow j+1) = F_{j,j+1} \left\{ (n_{1,j} - n_{1,j+1}) - (\bar{n}_{1,j} - \bar{n}_{1,j+1}) \right\} \quad (2.1.203)$$

$$G_2(j \rightarrow j+1) = F_{j,j+1} \left\{ (n_{2,j} - n_{2,j+1}) - (\bar{n}_{2,j} - \bar{n}_{2,j+1}) \right\} \quad (2.1.204)$$

となる。ここで、

$$\bar{n}_{1,j} = \frac{P}{R} \frac{\bar{C}_1}{T_j}, \quad \bar{n}_{1,j+1} = \frac{P}{R} \frac{\bar{C}_1}{T_{j+1}} \quad (2.1.205)$$

$$\bar{C}_1 = \frac{N_{1,j} + N_{1,j+1}}{V_j + V_{j+1}} = \frac{n_{1,j} V_j + n_{1,j+1} V_{j+1}}{V_j + V_{j+1}} \quad (2.1.206)$$

$$\bar{n}_{2,j} = \frac{P}{R} \frac{\bar{C}_2}{T_j}, \quad \bar{n}_{2,j+1} = \frac{P}{R} \frac{\bar{C}_2}{T_{j+1}} \quad (2.1.207)$$

$$\bar{C}_2 = \frac{N_{2,j} + N_{2,j+1}}{V_j + V_{j+1}} = \frac{n_{2,j} V_j + n_{2,j+1} V_{j+1}}{V_j + V_{j+1}} \quad (2.1.208)$$

$$\bar{C}_1 + \bar{C}_2 = 1 \quad (2.1.209)$$

である。

### (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 ( $Xe$ ) の流束  $J_{1,R}$  は、

$$J_{1,R} = F_{j-1,j} \left\{ (n_{1,j-1} - n_{1,j}) - (\bar{n}_{1,j-1} - \bar{n}_{1,j}) \right\} \quad (2.1.210)$$

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 ( $Xe$ ) の流束  $J_{1,S}$  は、

$$J_{1,S} = F_{j+1,j} \left\{ (n_{1,j} - n_{1,j+1}) - (\bar{n}_{1,j} - \bar{n}_{1,j+1}) \right\} \quad (2.1.211)$$

である。すると、セグメント  $j$  内のキセノンガスの量の変化は

$$V_j \frac{\partial n_{1,j}}{\partial t} = J_{1,R} - J_{1,S} \quad (2.1.212)$$

となる。

(2.1.212)式を(2.1.200)および(2.1.211)式を用いて陰解法を用いて差分化すると次式を得る。ただし、タイムステップ変数として  $k$  を用いる。

$$\frac{n_{1,j}^{k+1} - n_{1,j}^k}{\Delta t} = \frac{1}{V_j^{\theta 1}} \left\{ F_{j-1,j}^{\theta 1} \left[ (n_{1,j-1}^{\theta 2} - n_{1,j}^{\theta 2}) - (\bar{n}_{1,j-1}^{\theta 1} - \bar{n}_{1,j}^{\theta 1}) \right] - F_{j-1,j}^{\theta 1} \left[ (n_{1,j}^{\theta 2} - n_{1,j+1}^{\theta 2}) - (\bar{n}_{1,j}^{\theta 1} - \bar{n}_{1,j+1}^{\theta 1}) \right] \right\} \quad (2.1.213)$$

ここで、

$\theta_1$  = 溫度、容積、圧力、平衡モル比に関する補間

$\theta_2$  = モル濃度に関する補間

である。 $\theta_1$  は軸方向収束ループ内での補間パラメータであり、 $\theta_2$  は相互拡散計算での補間パラメータである。 $\theta_1$  は軸方向収束ループ内では変化するが、相互拡散計算では変化しないので定数として扱う。

調整パラメータ THG1,THG2

$\theta_1, \theta_2$  はそれぞれ THG1,THG2 で指定できる。標準値はともに 1.0 である。

したがって、(2.1.213)式について

$$n_{1,j}^{\theta 2} = (1 - \theta_2) n_{1,j}^k + \theta_2 n_{1,j}^{k+1} \quad (2.1.214)$$

の関係を入れて整理すると、

$$\begin{aligned} \frac{n_{1,j}^{k+1} - n_{1,j}^k}{\Delta t} &= \frac{\theta_2 F_{j-1,j}^{\theta 1}}{V_j^{\theta 1}} n_{1,j-1}^{k+1} - \frac{\theta_2 \{ F_{j,j+1}^{\theta 1} + F_{j-1,j}^{\theta 1} \}}{V_j^{\theta 1}} n_{1,j}^{k+1} \\ &+ \frac{\theta_2 F_{j-1,j}^{\theta 1}}{V_j^{\theta 1}} n_{1,j+1}^{k+1} + \frac{1}{V_j^{\theta 1}} \left\{ F_{j-1,j}^{\theta 1} \left[ (1 - \theta_2) (n_{1,j-1}^k - n_{1,j}^k) \right. \right. \\ &\left. \left. - (\bar{n}_{1,j-1}^{\theta 1} - \bar{n}_{1,j}^{\theta 1}) \right] - F_{j,j+1}^{\theta 1} \left[ (1 - \theta_2) (n_{1,j}^k - n_{1,j+1}^k) - (\bar{n}_{1,j}^{\theta 1} - \bar{n}_{1,j+1}^{\theta 1}) \right] \right\} \end{aligned} \quad (2.1.215)$$

となる。(2.1.215)式を整理して

$$A_j n_{1,j-1}^{k+1} + B_j n_{1,j}^{k+1} + C_j \cdot n_{1,j+1}^{k+1} = D_j \quad (2.1.216)$$

の形に書く。ここで、

$$A_j = -\frac{\theta_2 F_{j-1,j}^{\theta 1}}{V_j^{\theta 1}} \Delta t \quad (2.1.217)$$

$$B_j = 1 + -\frac{\theta_2 \{ F_{j-1,j}^{\theta 1} + F_{j,j+1}^{\theta 1} \}}{V_j^{\theta 1}} \Delta t \quad (2.1.218)$$

$$C_j = -\frac{\theta_2 F_{j,j+1}^{\theta_1}}{V_j^{\theta_1}} \Delta t \quad (2.1.219)$$

$$\begin{aligned} D_j &= \frac{1}{V_j^{\theta_1}} F_{j,j-1}^{\theta_1} (1-\theta_2) \Delta t n_{1,j-1}^k + \left\{ 1 - \frac{1}{V_j^{\theta_1}} (F_{j,j-1}^{\theta_1} + F_{j,j+1}^{\theta_1}) (1-\theta_2) \Delta t \right\} n_{1,j}^k \\ &\quad + \frac{1}{V_j^{\theta_1}} F_{j,j+1}^{\theta_1} (1-\theta_2) \Delta t n_{1,j+1}^k + \frac{1}{V_j^{\theta_1}} \left\{ F_{j,j+1}^{\theta_1} (\bar{n}_{1,j}^{\theta_1} - \bar{n}_{1,j+1}^{\theta_1}) - F_{j,j-1}^{\theta_1} (\bar{n}_{1,j-1}^{\theta_1} - \bar{n}_{1,j}^{\theta_1}) \right\} \Delta t \end{aligned} \quad (2.1.220)$$

である。

上下部セグメント(プレナムも含めて)について考える。

第1セグメントでは境界面  $R$  はないため

$$\begin{aligned} V_1 \frac{\partial n_{1,1}}{\partial t} &= -J_{1,S} \\ &= -F_{1,2} [(n_{1,1} - n_{1,2}) - (\bar{n}_{1,1} - \bar{n}_{1,2})] \end{aligned} \quad (2.1.221)$$

である。したがって

$$\begin{aligned} \frac{n_{1,1}^{k+1} - n_{1,1}^k}{\Delta t} &= -\frac{\theta_2 F_{1,2}^{\theta_1}}{V_1^{\theta_1}} n_{1,1}^{k+1} + \frac{\theta_2 F_{1,2}^{\theta_1}}{V_1^{\theta_1}} n_{1,2}^{k+1} - \frac{(1-\theta_2) F_{1,2}^{\theta_1}}{V_1^{\theta_1}} n_{1,1}^k \\ &\quad + \frac{(1-\theta_2) F_{1,2}^{\theta_1}}{V_1^{\theta_1}} n_{1,2}^k + \frac{F_{1,2}^{\theta_1}}{V_1^{\theta_1}} (\bar{n}_{1,1}^{\theta_1} - \bar{n}_{1,2}^{\theta_1}) \end{aligned} \quad (2.1.222)$$

となる。この式を

$$\begin{aligned} B_1 &= 1 + \frac{\theta_2 F_{1,2}^{\theta_1}}{V_1^{\theta_1}} \Delta t, C_1 = -\frac{\theta_2 F_{1,2}^{\theta_1}}{V_1^{\theta_1}} \Delta t \\ D_1 &= \left( 1 - \frac{(1-\theta_2) F_{1,2}^{\theta_1}}{V_1^{\theta_1}} \Delta t \right) n_{1,1}^k + \frac{(1-\theta_2) F_{1,2}^{\theta_1}}{V_1^{\theta_1}} \Delta t n_{1,2}^k + \frac{F_{1,2}^{\theta_1}}{V_1^{\theta_1}} (\bar{n}_{1,1}^{\theta_1} - \bar{n}_{1,2}^{\theta_1}) \Delta t \end{aligned} \quad (2.1.223)$$

とおいて整理すれば、

$$B_1 \cdot n_{1,1}^{k+1} + C_1 \cdot n_{1,2}^{k+1} = D_1 \quad (2.1.224)$$

と書ける。

同様に最上部の第  $n$  セグメントでは境界面  $S$  はないので、

$$\begin{aligned} V_n \frac{\partial n_{1,n}}{\partial t} &= -J_{1,R} \\ &= -F_{n-1,n} [(n_{1,n-1} - n_{1,n}) - (\bar{n}_{1,n-1} - \bar{n}_{1,n})] \end{aligned} \quad (2.1.225)$$

である。したがって、

$$\begin{aligned} A_n &= -\frac{\theta_2 F_{n-1,n}^{\theta 1}}{V_n^{\theta 1}} \Delta t, B_n = 1 + \frac{\theta_2 F_{n-1,n}^{\theta 1}}{V_n^{\theta 1}} \Delta t \\ D_n &= \frac{(1-\theta_2) F_{n-1,n}^{\theta 1}}{V_n^{\theta 1}} \Delta t n_{1,n-1}^k + \left(1 - \frac{(1-\theta_2) F_{n-1,n}^{\theta 1}}{V_n^{\theta 1}} \Delta t\right) n_{1,n,n}^k - \frac{F_{n-1,n}^{\theta 1}}{V_n^{\theta 1}} (\bar{n}_{1,n-1}^{\theta 1} - \bar{n}_{1,n}^{\theta 1}) \Delta t \end{aligned} \quad (2.1.226)$$

とおくと、

$$A_n \cdot n_{1,n-1}^{k+1} + B_n \cdot n_{1,n}^{k+1} = D_n \quad (2.1.227)$$

が成り立つ。

以上をまとめると、ガス 1 の拡散について次のような方程式を得る。

$$\begin{bmatrix} B_1 C_1 \\ A_2 B_2 C_2 \\ A_3 B_3 C_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ A_{n-2} B_{n-2} C_{n-2} \\ A_{n-1} B_{n-1} C_{n-1} \\ A_n B_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_{1,1}^{k+1} \\ n_{1,2}^{k+1} \\ n_{1,3}^{k+1} \\ \vdots \\ \vdots \\ n_{1,n-2}^{k+1} \\ n_{1,n-1}^{k+1} \\ n_{1,n}^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ D_{n-2} \\ D_{n-1} \\ D_n \end{bmatrix} \quad (2.1.228)$$

(2.1.228)式を解くことにより、各セグメントのガス濃度が求められる。

#### (4) 相互拡散定数

ガスの相互拡散定数は、Present の式を用いた<sup>(35)</sup>。すなわち、

$$D^{12} = \frac{3}{8} \left( \frac{\pi k T}{2 m^*} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{n \pi d_{12}^2} \quad (2.1.229)$$

である。ここで

$$m^* = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \quad (m : 1 \text{ 分子の重量})$$

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

$$n = n_1 + n_2 \quad (\text{分子密度})$$

$$k : \text{ボルツマン定数}$$

$$T : \text{温度 (K)}$$

である。

### (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、

$$N_j = \sum_i N_{ij} \quad (i \text{ はガスの種類}) \quad (2.1.230)$$

と書ける。さらに燃料棒内全空間について

$$N = \sum_j N_j \quad (2.1.231)$$

と書ける。

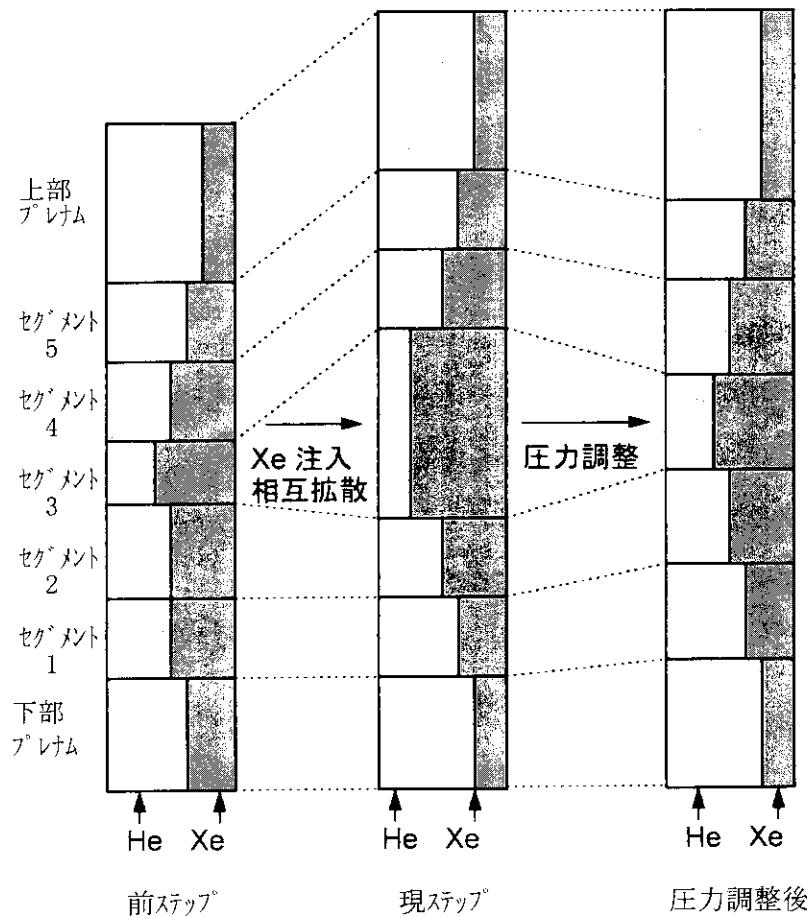


図 2.28 圧力調整の計算（縦軸・モル数）

理想気体の法則より

$$P = N \cdot R \cdot \frac{1}{\sum_j \left( \frac{V}{T} \right)_j} \quad (2.1.232)$$

が成り立つことから、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

$$N'_j = \frac{P}{R} \left( \frac{V}{T} \right)_j \quad (2.1.233)$$

を得る。

$N_j$  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、

$N_{i \rightarrow j}$  :  $i$  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

$$N'_{ij} = f_{ij} \left\{ N_j - \sum_k N_{j \rightarrow k} \right\} + \sum_l f_{il} N_{l \rightarrow j} \quad (2.1.234)$$

である。

#### (6) プレナム体積の求め方

燃料棒内空隙体積は、プレナム体積、ギャップ体積、ペレット中心孔体積、スタック内部の開気ガス体積の 4 つの部分に分ける。これは、圧力計算をする場合、各体積毎に参照温度が違うためである。スタック内の開気ガス体積は、ディッシュ部体積、チャンファ体積、ペレット端面間ギャップ体積、およびクラック空隙空間から成る。

EXBURN-I コードでは、この 4 つの部分のうちペレット中心孔体積とスタック内部の開気ガス体積は、照射中に体積変化しないと仮定する。

中心孔体積は、ペレット初期内半径を  $r_{pi}$ 、軸方向セグメント  $j$  の軸方向長を  $l_z^j$  とすると、

$$V_h^j = \pi r_{pi}^2 l_z^j \quad (2.1.235)$$

で与えられる。ここで 1 ペレット長を  $l_p$ 、ペレット 1 個当たりのペレット端面間ギャップ体積を  $V_p$ 、クラック空隙空間体積を  $V_{crack}$  とすると、

$$V_p = \pi r_{po}^2 \Delta l / 2 \quad (2.1.236)$$

$$V_{crack} = 2\pi r_{po} u^{rel} l_p \quad (2.1.237)$$

ただし

$r_{po}$  : ペレット外半径

$\Delta l$  : ペレット端面間のすきま

$u^{rel}$  : ペレットの半径方向リロケーションによる変位

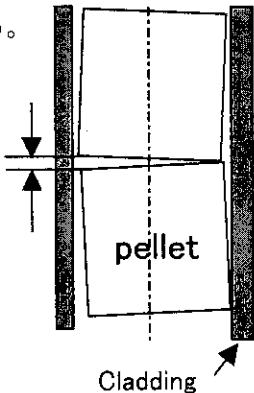
である。ただし、 $\Delta l$ （ペレット端面間のすきま）は右図のように定義する。

さらにペレット1個当たりのディッシュ体積を $V_{dish}$ 、チャンファ部体積

を $V_{cham}$ とすれば、軸方向セグメント $j$ におけるスタック内の開気ガス

体積 $V_{int}^j$ は、

$$V_{int}^j = \left( V_{dish} + V_{cham} + \pi r_{po}^2 \Delta l / 2 + 2\pi r_{po} u^{rel} \cdot l_p \right) \frac{l_z^j}{l_p} \quad (2.1.238)$$



として与えられる。

一方、プレナム体積とギャップ体積については照射中での体積変化を

考慮する。プレナム体積変化は、スタック部分における軸方向セグメント長の変化を考慮して、次のようにして求める。

軸方向セグメント $j$ でのペレットの体積平均熱膨張ひずみを $\varepsilon_{th}^j$ 、やきしまりひずみを $\varepsilon_{den}^j$ 、固体スウェーリングひずみ $\varepsilon_{ss}^j$ をとすると、これらのひずみによる変化を考慮したときのセグメント長さ $\tilde{l}_{z,p}^j$ は、

$$\tilde{l}_{z,p}^j = \left( 1 + \varepsilon_{th}^j + \varepsilon_{den}^j + \varepsilon_{ss}^j \right) l_z^j \quad (2.1.239)$$

であたえられる。

また、被覆管では熱ひずみを $\Delta\varepsilon_{c,th}^j$ 、照射成長によるひずみを $\Delta\varepsilon_{c,irr}^j$ とすると、これらのひずみによる変化を考慮した時のセグメント長さ $\tilde{l}_{z,C}^j$ は、

$$\tilde{l}_{z,C}^j = \left( 1 + \varepsilon_{c,th}^j + \varepsilon_{c,irr}^j \right) l_z^j \quad (2.1.240)$$

である。

同様にプレナム長 $l_{z,pl}$ に対しても、

$$l_{z,pl} = \left( 1 + \varepsilon_{c,th}^{pl} + \varepsilon_{c,irr}^{pl} \right) l_{z,pl} \quad (2.1.241)$$

とすると、プレナムの体積変化 $\Delta V_{pl}$ は、

$$\Delta V_{pl} = \pi r_{ci}^2 \left( \sum_{j=1}^{NAXI} \left( \tilde{l}_{z,C}^j - \tilde{l}_{z,p}^j \right) + \tilde{l}_{z,pl} - l_{z,pl} \right) \quad (2.1.242)$$

となる。ここでNAXIは軸方向セグメント数、 $r_{ci}$ は被覆管内半径である。

したがって、プレナム体積は初期のプレナム体積を $V_{pl}$ とすると、

$$\tilde{V}_{pl} = V_{pl} + \Delta V_{pl} \quad (2.1.243)$$

で与えられる。

一方、スタック部の軸方向セグメント  $j$  におけるギャップ体積については、(2.1.77)式で求めた燃料と被覆管のギャップ幅  $\delta$  を用いて、（ただし、 $\delta < 0$  のときは  $\delta = 0$  とする）

$$\tilde{V}_{gap,j} = 2\pi r_{ci} \cdot \delta \cdot \tilde{l}_{z,p}^j \quad (2.1.244)$$

として与える。

#### (7)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。

$$P_{gas} = \frac{n_T \cdot R}{\frac{V_{pl}}{T_{pl}} + \sum_{j=1}^M \left( \frac{V_{gap}^j}{T_{gap}^j} + \frac{V_h^j}{T_{pl}^j} + \frac{V_{int}^j}{T_{av}^j} \right)} \quad (2.1.245)$$

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 · 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)

$V_{gap}^j$  : 軸方向セグメント  $j$  のギャップ容積( $m^3$ )

$V_h^j$  : 軸方向セグメント  $j$  の中心孔容積( $m^3$ )

$V_{int}^j$  : スタック内部の開気ガス容積( $m^3$ )

$T_{gap}^j$  : 軸方向セグメント  $j$  のギャップ温度(K)

$$= 0.5(T_{ps}^j + T_{ci}^j)$$

$T_{pl}^j$  : 軸方向セグメント  $j$  の中心温度(K)

$T_{av}^j$  : 軸方向セグメント  $j$  のペレット体積平均温度(K)

である。

#### 調整パラメータ DTPL

プレナムガス温度  $T_{pl}$  は、冷却材温度  $T_{cool}$  を用いて、  
 $T_{pl} = T_{cool} + DTPL$  で与えられる。DTPL の標準値は 25K である。

### 2.1.6 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、計算全体に対する制限  $\Delta t_1$ 、および熱計算のタイムステップの細分化のための、ガス拡散計算における制限  $\Delta t_2$  が与えられる。

①  $\Delta t_1$  は、以下の 4 条件の値のうち、最小の値とする。

- (1) 1 タイムステップ内での線出力の変化を  $10\text{W}/\text{cm} \cdot \text{s}$  以下にする値。
- (2) 1 タイムステップ内での燃焼度の増加を  $500\text{MWd/tU}$  以下にする値。
- (3) 1 タイムステップ内でのクリープひずみ速度を、クリープひずみ増分が弾性ひずみを越えないようにする値。
- (4) 前のタイムステップ幅を 1.5 倍とした値。

条件(1)(2)は、出力変化が  $10\text{W}/\text{cm} \cdot \text{s}$  以上の非定常状態の場合、解を安定させるために、1 タイムステップ中の出力変化が  $10\text{W}/\text{cm}$ 、燃焼度変化が  $100\sim500\text{MWd/t}$  に収まるようにサブルーチン PHIST で決定される。

条件(3)は、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である。すなわち、

$$\Delta t \leq \frac{\bar{\sigma}}{E \cdot \dot{\varepsilon}^c} \cdot \text{EFCOEF} \quad (2.1.246)$$

とする。

また、条件(4)は、 $10\text{W}/\text{cm} \cdot \text{s}$  以下で  $\Delta t_1$  が増大する場合、前ステップで用いた  $\Delta t_1$  の 1.5 倍以下になるような制限である。

ただし、熱的解析においては、以下のようにして  $\Delta t_1$  より小さなタイムステップ  $\Delta t_1$  で計算されることがある。

また、燃料棒全長の力学解析および局所力学解析では、その内部だけで、被覆管とペレットの接触状態の変化などにより、 $\Delta t_1$  の細分化が行われる。2.2.11 および 2.3.3 節を参照のこと。

②  $\Delta t_2$  は、 $\Delta t_1$  を細分化するタイムステップ幅で、 $100\text{ms}$  または  $\Delta t_1$  を上限として、ガスの拡散流動が各軸方向セグメントでの平衡に達するまでの時間と、セグメント間のガス最大移動量および圧力調整条件で決定する時間幅のうちもっとも短いものとして決定する。

セグメント毎の平衡に達するまでの時間は、(2.1.212)式を参考にして、

$$\Delta t_j^i = \frac{(n_{1,j} - \bar{n}_{1,j})V_j}{J_{1,R} - J_{1,S}} \quad (2.1.247)$$

である。ここで添字  $i$  は軸方向セグメント番号である。

次に、セグメント間のガス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

モル数を  $N_{max}$  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、

$$\Delta t_j^2 = \frac{N_{max}}{(J_{1,R})_j} \quad (2.1.248)$$

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。瞬時の圧力平衡の仮定より、ガスがセグメント間を往来することによる計算上の数値的振動が生じることが考えられる。こうした解の振動を防ぐために、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必要がある。セグメント毎のガス放出速度 (mol/s) を  $B$  とすると、制限は、

$$\Delta t_j^3 = \frac{N_{max}}{B_j} \quad (2.1.249)$$

となる。これらの条件から  $\Delta t_2$  は、

$$\Delta t_{21} = \min(\Delta t_1^1, \Delta t_2^1, \dots, \Delta t_n^1) \cdot \eta_2 \quad (2.1.250)$$

$$\Delta t_{22} = \min(\Delta t_1^2, \Delta t_2^2, \dots, \Delta t_n^2) \quad (2.1.251)$$

$$\Delta t_{23} = \min(\Delta t_1^3, \Delta t_2^3, \dots, \Delta t_n^3) \quad (2.1.252)$$

を用いて、

$$\Delta t_2 = \min(\Delta t_{21}, \Delta t_{22}, \Delta t_{23}) \quad (2.1.253)$$

で与えられる。ここで  $\eta_2$  と、(2.1.248)、(2.1.249)式中の  $N_{max}$  は、組み込みの制御パラメータである。

調整パラメータ AMLMX2, AMLX3, DTTPR, FAC

(2.1.248)式  $N_{max}$  は AMLMX2 により指定できる。標準値  $10^{-6}$ (mole)。

(2.1.249)式  $N_{max}$  は AMLMX3 により指定できる。標準値  $2 \times 10^{-6}$ (mole)。

(2.1.250)式  $\eta_2$  は DTTPR により指定できる。標準値は 0.01。

(2.1.246)式の EFCOEF の標準値は 1.0。

## 2.2 燃料棒全長での力学的ふるまい

(詳細な力学解析 [FEMROD] \*)

### 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・ひずみ解析は、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。

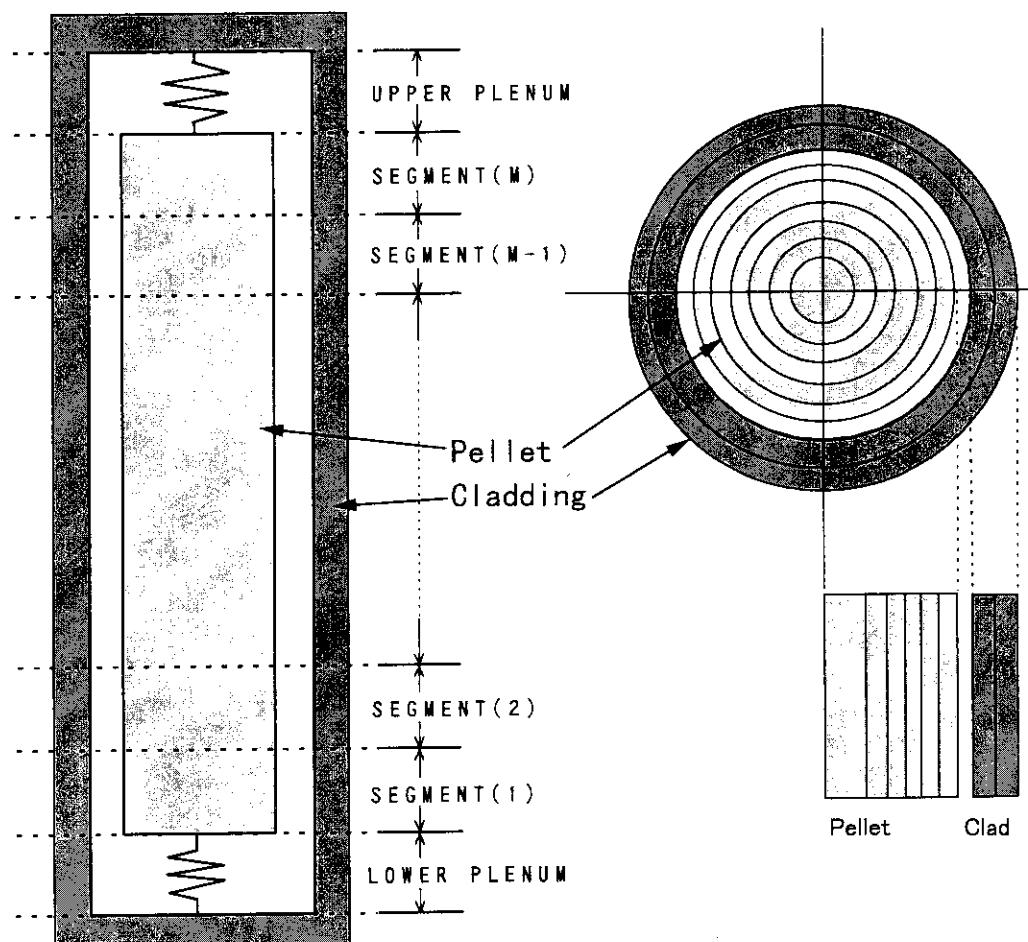


図 2.29 形状モデル

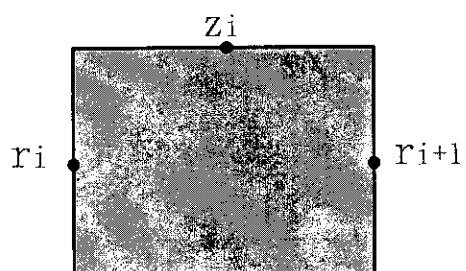


図 2.30 四角形 3 自由度モデル

また、メッシュ切りと節点座標の関係を1つの軸方向セグメントについて図2.31に示す。

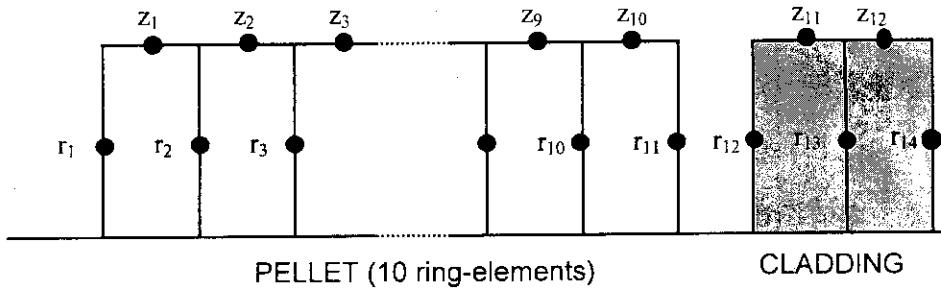


図2.31 有限要素法メッシュ切り (1セグメント相当)

図2.33に示すように、各節点は1自由度のみを持つ。ペレットの軸方向自由度を持つ節点 $z_1 \sim z_{10}$ については、各節点の軸方向の変位が一様であると仮定し、代表して1つの節点自由度で扱うこととし、

$$z_1 = z_2 = z_3 = \dots = z_{10} (=z_s) \quad (2.2.1)$$

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  $u$ 、軸方向変位  $v$  とすると、図2.2.7で示した要素内の任意の点 $(r, z)$ における変位 $(u, v)$ は、

$$u = \frac{r_{i+1} - r}{r_{i+1} - r_i} u_i + \frac{r - r_i}{r_{i+1} - r_i} u_{i+1} \quad (2.2.2)$$

$$v = \frac{z}{z_i} v_i \quad (2.2.3)$$

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。

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \partial u / \partial r \\ u / r \\ \partial v / \partial z \end{Bmatrix} = [B]\{u\} \quad (2.2.4)$$

(2.2.2)～(2.2.3)式を用いれば、

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial r} &= -\frac{1}{r_{i+1} - r_i} u_i + \frac{1}{r_{i+1} - r_i} u_{i+1} \\ \frac{u}{r} &= \frac{r_{i+1} - r}{r(r_{i+1} - r_i)} u_i + \frac{r - r_i}{r(r_{i+1} - r_i)} u_{i+1} \end{aligned} \quad (2.2.5)$$

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、

$$\begin{aligned} \frac{u}{r} &= \frac{\frac{r_{i+1}}{2} - \frac{r_i + r_{i+1}}{2}}{\frac{r_i + r_{i+1}}{2}(r_{i+1} - r_i)} u_i + \frac{\frac{r_i}{2} + \frac{r_{i+1}}{2} - r_i}{\frac{r_i + r_{i+1}}{2}(r_{i+1} - r_i)} u_{i+1} \\ &= \frac{1}{r_i + r_{i+1}} u_i + \frac{1}{r_i + r_{i+1}} u_{i+1} \end{aligned} \quad (2.2.6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial z} = \frac{1}{z_i} v_i \quad (2.2.7)$$

となる。(2.2.5)~(2.2.7)式を(2.2.4)式に代入すれば、

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{r,i} \\ \varepsilon_{\theta,i} \\ \varepsilon_{z,i} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{r_{i+1} - r_i} & \frac{1}{r_{i+1} - r_i} & 0 \\ \frac{1}{r_{i+1} + r_i} & \frac{1}{r_{i+1} + r_i} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{z_i} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_{i+1} \\ v_i \end{Bmatrix} \quad (2.2.8)$$

を得る。

したがって、[B] マトリクスの成分として

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

を得る。

また、各要素の体積  $V_i$  は、

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

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、

$$\{\Delta\sigma\} = [D] \{\Delta\varepsilon^e\} \quad (2.2.11)$$

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、

$$\{\Delta\varepsilon^e\} = [C] \{\Delta\sigma\} \quad (2.2.12)$$

と書け、  $[C]$  マトリクスは、

$$[C] = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu \\ -\nu & 1 & -\nu \\ -\nu & -\nu & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2.13)$$

で与えられる。ここではヤング率、 $\nu$ 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  $\{\Delta\varepsilon_0\}$  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、

$$\{F_{n+1}\} = \int [B]^T \{\sigma_{n+1}\} dV \quad (2.2.14)$$

で与えられる。ただし

$\{F_{n+1}\}$  : 第  $n+1$  ステップの外力ベクトル、

$\{\sigma_{n+1}\}$  : 第  $n+1$  ステップの応力ベクトル

である。

未知量と既知量を明確に区別するために  $\{\sigma_{n+1}\}$  を、既知の応力  $\{\sigma_n\}$ 、未知の応力増分  $\{\Delta\sigma_{n+1}\}$  にわけることにより、

$$\{F_{n+1}\} = \int [B]^T \{\sigma_n\} dV + \int [B]^T \{\Delta\sigma_{n+1}\} dV \quad (2.2.15)$$

$$\int [B]^T \{\Delta\sigma_{n+1}\} dV = \{F_{n+1}\} - \int [B]^T \{\sigma_n\} dV \quad (2.2.16)$$

と変形する。(2.2.16)式では右辺は既知量、左辺は未知量である。さらに、(2.2.11)式を(2.2.16)式に代入すると

$$\int [B]^T [D] \{\Delta\varepsilon_{n+1}^e\} dV = \{F_{n+1}\} - \int [B]^T \{\sigma_n\} dV \quad (2.2.17)$$

となる。ここで、弾性歪み増分  $\{\Delta\varepsilon_{n+1}^e\}$ 、全歪み増分  $\{\Delta\varepsilon_{n+1}\}$ 、および既知量である初期歪み増分  $\{\Delta\varepsilon_{0,n+1}\}$  との間には、

$$\{\Delta\varepsilon_{n+1}^e\} = \{\Delta\varepsilon_{n+1}\} - \{\Delta\varepsilon_{0,n+1}\} \quad (2.2.18)$$

の関係が成り立つので、(2.2.18)式を(2.2.17)式に代入すると、

$$\int [B]^T [D] \{ \Delta \varepsilon_{n+1} - \Delta \varepsilon_{0,n+1} \} dV = \{ F_{n+1} \} - \int [B]^T \{ \sigma_n \} dV \quad (2.2.19)$$

が得られる。ここで既知量である  $\int [B]^T [D] \{ \Delta \varepsilon_{0,n+1} \} dV$  を右辺に移行すると

$$\int [B]^T [D] \{ \Delta \varepsilon_{n+1} \} dV = \{ F_{n+1} \} + \int [B]^T [D] \{ \Delta \varepsilon_{0,n+1} \} dV - \int [B]^T \{ \sigma_n \} dV \quad (2.2.20)$$

となる。(2.2.20)式に(2.2.4)式を代入すれば、

$$\begin{aligned} & \int [B]^T [D] [B] dV \{ \Delta u_{n+1} \} \\ &= \{ F_{n+1} \} + \int [B]^T [D] \{ \Delta \varepsilon_{0,n+1} \} dV - \int [B]^T \{ \sigma_n \} dV \end{aligned} \quad (2.2.21)$$

となり、未知量  $\{ \Delta u_{n+1} \}$  を積分から繰り出すことができる。

結局、(2.2.21)式をM個の要素の和の形に離散化して表すと、

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^M [B_i]^T [D_i] [B_i] \Delta V_i \{ \Delta u_{n+1} \} \\ &= \{ F_{n+1} \} + \sum_{i=1}^M [B_i]^T [D_i] \{ \Delta \varepsilon_{0,n+1}^i \} \Delta V_i - \sum_{i=1}^M [B_i]^T \{ \sigma_n^i \} \Delta V_i \\ & \quad (\Delta V_i : \text{要素 } i \text{ の体積}, M : \text{要素総数}) \end{aligned} \quad (2.2.22)$$

とすることにより、未知量の変位増分ベクトル  $\{ \Delta u_{n+1} \}$  を既知量を用いて表すことができる。

以上が計算方法の基本的な考え方であるが、実際の計算の計算においては、クリープ、塑性について陰解法を用いているため、さらに複雑な解法となる。次項に、陰解法を用いた場合の基本式の取扱いを示す。

## 2.2.2 基本式

時刻  $t_{n+1}$  における平衡条件は、(2.2.14)式と同様に仮想仕事の原理より次のように表される。

$$\int_V [B]^T \{ \sigma_{n+1} \} dV - \{ F_{n+1} \} = 0 \quad (2.2.23)$$

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(2.2.12)は [C] が時間依存することを考慮して以下のように書く。

$$\{ \Delta \varepsilon_{n+1}^e \} = [C_{n+\theta}] \{ \Delta \sigma_{n+1} \} \quad (2.2.24)$$

ここで、

$$[C_{n+\theta}] = (1-\theta)[C_n] + \theta[C_{n+1}] \quad \left( \theta = \frac{1}{2} \right)$$

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

$[C_{n+\theta}]$  : ひずみ一応力マトリクス

$\{\Delta\sigma_{n+1}\}$  : 応力増分ベクトル

$\theta$  : 陰解法のパラメータ

である。

また、弾性ひずみ増分は次のように表される。

$$\begin{aligned} \{\Delta\epsilon_{n+1}^e\} &= \{\Delta\epsilon_{n+1}\} - \{\Delta\epsilon_{n+1}^{th}\} - \{\Delta\epsilon_{n+1}^{rel}\} - \{\Delta\epsilon_{n+1}^{crk}\} - \{\Delta\epsilon_{n+1}^{den}\} - \{\Delta\epsilon_{n+1}^{sw}\} \\ &\quad - \{\Delta\epsilon_{n+1}^{HP}\} - \{\Delta\epsilon_{n+1}^P\} - \{\Delta\epsilon_{n+1}^c\} \end{aligned} \quad (2.2.25)$$

ここで、

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

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

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

$\{\Delta\epsilon_{n+1}^{crk}\}$  : ペレットクラックひずみ増分ベクトル

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

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

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

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

$\{\Delta\epsilon_{n+1}^c\}$  : 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。

$$\{\Delta\epsilon_{n+1}^o\} = \{\Delta\epsilon_{n+1}^{th}\} - \{\Delta\epsilon_{n+1}^{rel}\} - \{\Delta\epsilon_{n+1}^{den}\} - \{\Delta\epsilon_{n+1}^{sw}\} \quad (2.2.26)$$

$\{\Delta\epsilon_{n+1}^o\}$  : 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、(2.2.25)式を次のように書くことができる。

$$\{\Delta\epsilon_{n+1}^e\} = \{\Delta\epsilon_{n+1}\} - \{\Delta\epsilon_{n+1}^o\} - \{\Delta\epsilon_{n+1}^{crk}\} - \{\Delta\epsilon_{n+1}^P\} - \{\Delta\epsilon_{n+1}^c\} \quad (2.2.27)$$

ここで、

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

$\{\Delta\epsilon_{n+1}^c\}$  : 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。

$$\{\Delta \varepsilon_{n+1}\} = [B] \{\Delta u_{n+1}\} \quad (2.2.28)$$

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

(2.2.25)式及び(2.2.27)式を用いれば応力-ひずみ関係式(2.2.24)式は、

$$[C_{n+\theta}] \{\Delta \sigma_{n+1}\} - [B] \{\Delta u_{n+1}\} + \{\Delta \varepsilon_{n+1}^o\} + \{\Delta \varepsilon_{n+1}^{crk}\} + \{\Delta \varepsilon_{n+1}^P\} + \{\Delta \varepsilon_{n+1}^c\} = 0 \quad (2.2.29)$$

となる。

さて、タイムステップ第 n+1 ステージの計算において、(2.2.25)式における応力に依存する歪み増分ベクトル  $\{\Delta \varepsilon_{n+1}^{crk}\}$ 、 $\{\Delta \varepsilon_{n+1}^P\}$ 、 $\{\Delta \varepsilon_{n+1}^c\}$  を求めるために、応力計算の反復計算が必要となる。

そこで、反復計算に Newton-Raphson 法を用いるが、その反復計算のカウントを i で表すこととする。ここで第 i 回目が終了し、第 i+1 回目の反復を行っているとき、(2.2.29)式を次のように書く。

$$\begin{aligned} & [C_{n+\theta}^i] \{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} - [B] \{\Delta u_{n+1}^{i+1}\} \\ & + \{\Delta \varepsilon_{n+1}^o\} + \{\Delta \varepsilon_{n+1}^{crk,i+1}\} + \{\Delta \varepsilon_{n+1}^{P,i+1}\} + \{\Delta \varepsilon_{n+1}^{c,i+1}\} + [C_{n+\theta}^i] (\{\sigma_{n+1}^i\} - \{\sigma_n\}) = 0 \end{aligned} \quad (2.2.30)$$

ここで、

$$\{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} = \{\sigma_{n+1}^{i+1}\} - \{\sigma_{n+1}^i\}$$

である。

モデルパラメータ LMAX  
Newton-Raphson 法による反復計算  
の回数は LMAX で与えられる。  
LMAX の標準値は 2 である。

また、このとき平衡条件(2.2.23)式は次のようになる。

$$\int_V [B]^T \{\sigma_{n+1}^i\} dV + \int_V [B]^T \{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} dV = \{F_{n+1}\} \quad (2.2.31)$$

(2.2.30)、(2.2.31)式において、未知量は  $\{d\sigma_{n+1}^{i+1}\}$ 、 $\{\Delta \varepsilon_{n+1}^{crk,i+1}\}$ 、 $\{\Delta \varepsilon_{n+1}^{P,i+1}\}$ 、 $\{\Delta \varepsilon_{n+1}^{c,i+1}\}$  および  $\{\Delta u_{n+1}^{i+1}\}$  である。したがって、このままでは式の数 ((2.2.30)および(2.2.31)式の 2 式) に対して未知量の数が大きすぎるので、解は得られない。そのため、未知量も 2 個にする必要がある。

そこで、 $\{d\sigma_{n+1}^{i+1}\}$  に依存する未知量  $\{\Delta \varepsilon_{n+1}^{crk,i+1}\}$ 、 $\{\Delta \varepsilon_{n+1}^{P,i+1}\}$ 、 $\{\Delta \varepsilon_{n+1}^{c,i+1}\}$  を  $\{\Delta u_{n+1}^{i+1}\}$  と  $\{d\sigma_{n+1}^{i+1}\}$  を用いて表わし、消去する必要がある。次項以下にその具体的な方法を述べる。

### 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、熱的解析モデル中の 2.1.3 項(3)～(5)において説明した。ここでは、熱的解析モデルにおけるクラックモデルとの相違点をのべ、力学的モデルの概念については図 2.32<sup>(1),(3)</sup>に模式的に示して説明する。

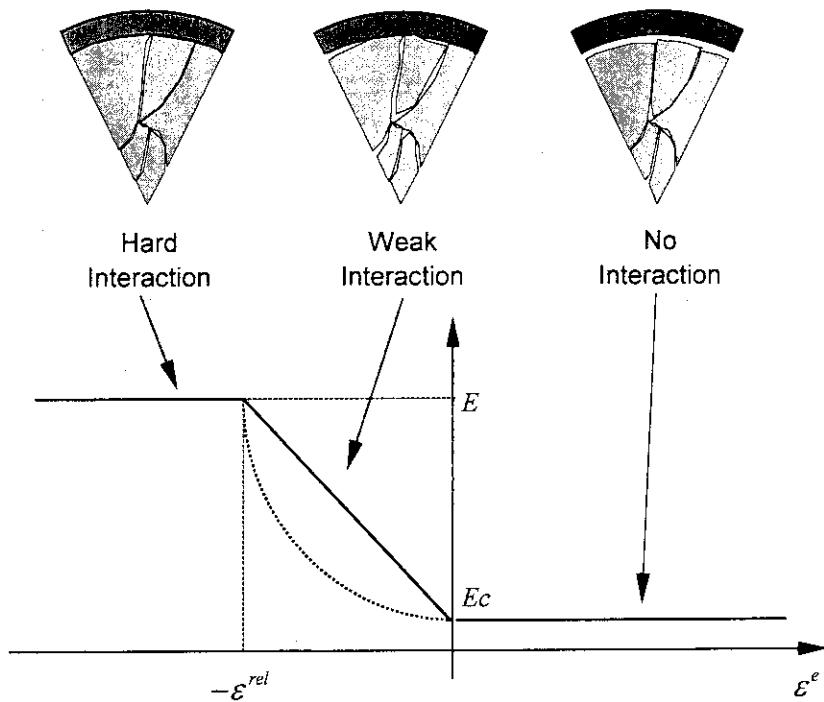


図 2.32 クラックが発生したペレットの剛性モデル

ここでは、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、 $i$  方向ヤング率は本来の物性値の約 1/100 になると仮定する。(詳細な力学的解析ではヤング率は FEM マトリックスの対角項に位置するので、その値を 0 にはできない。熱的解析モデルでは、このヤング率は 0 として定式化を行った。) また、圧縮状態のときには、リロケーションひずみに依存して弾性が回復されると仮定する。すなわち、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、次のようにモデル化される。

- ① 被覆管と非接触のとき、ペレットは割れているため熱応力による熱膨張への拘束が少なく、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する。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、ペレットの剛性が大きくなる。この過程はペレットのヤング率を変化させることによって近似される。

すなわちここでは、割れてリロケーションしたペレットと被覆管との間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がモデル化されている。

③ 次に、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被覆管により圧縮されたとき、ペレットは完全な弾性（本来の物性値としての弾性係数=圧縮剛性）を回復する。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。

調整パラメータ ECRAC3

クラック時のヤング率は ECRAC3 で指定する。標準値は  $2 \times 10^9 \text{ N/m}^2$  で  $\text{UO}_2$  のヤング率の約 1/100 である。

モデルパラメータ IYNG (力学計算のみ)

IYNG の標準値は 1 である。このとき、図 2.34 に示すペレットの剛性変化モデルにおいて、 $-\varepsilon^{rel}$  から 0 の間が直線で結ばれる。

IYNG=0 の場合、 $-\varepsilon^{rel}$  から 0 の間が下に凸の二次関数で結ばれる。

次に、以上のモデルに基づいて力学解析を行う方法を説明する。

ペレットクラックは(2.2.29)式中の [C] マトリックスの要素を(2.2.13)式から次のように変更することによって、 $\{\Delta\sigma\}$  の変化に比例してクラック歪み増分  $\{\Delta\varepsilon_{n+1}^{crk}\}$  が与えられる。ここで、ペレットのひずみ-応力マトリクス  $[\tilde{C}]$  は次のように表す。

$$[\tilde{C}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_r} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E_z} & -\frac{\nu}{E} \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E_\theta} \end{bmatrix} \quad (2.2.32)$$

ここで、 $E_r$  : 径方向のみかけのヤング率(Pa)

$E_z$  : 軸方向のみかけのヤング率(Pa)

$E_\theta$  : 周方向のみかけのヤング率(Pa)

$E$  : ペレットヤング率 (本来の物性値) (Pa)

$\nu$  : ポアソン比 (-)

である。

各方向のみかけのヤング率  $E_i$  ( $E_r$ ,  $E_z$ ,  $E_\theta$ ) は次のように定義する。

$$E_i = \begin{cases} E_c & , \quad 0 \leq \varepsilon_i - \varepsilon_i^o \\ -\frac{\varepsilon_i - \varepsilon_i^o}{\varepsilon_i^{rel}}(E - E_c) + E_c & , \quad -\varepsilon_i^{rel} < \varepsilon_i - \varepsilon_i^o < 0 \\ E & , \quad \varepsilon_i - \varepsilon_i^o \leq -\varepsilon_i^{rel} \end{cases} \quad (2.2.33)$$

ここで、

$\varepsilon_i$  : i 方向ひずみ

$\varepsilon_i^o$  : i 方向初期ひずみ

$\varepsilon_i^{rel}$  : 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。

(2.2.24)式より、

$$\{\Delta\varepsilon_{n+1}^e\} = [C_{n+\theta}] \{\Delta\sigma_{n+1}\} \quad (2.2.34)$$

また、弾性歪み増分とクラック歪み増分との和を

$$\{\Delta\varepsilon_{n+1}^e + \Delta\varepsilon_{n+1}^{crk,i+1}\} = [\tilde{C}_{n+\theta}] \{\Delta\sigma_{n+1}^{i+1}\} \quad (2.2.35)$$

とおく。クラック歪み増分ベクトルは、(2.2.34)、(2.2.35)式より、

$$\begin{aligned} \{\Delta\varepsilon_{n+1}^{crk,i+1}\} &= \left[ [\tilde{C}_{n+\theta}] - [C_{n+\theta}] \right] \{\Delta\sigma_{n+1}^{i+1}\} \\ &= \left[ \begin{bmatrix} \frac{1}{E_r} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E_z} & -\frac{\nu}{E} \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E_\theta} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} \end{bmatrix} \right] \begin{Bmatrix} \Delta\sigma_{r,n+1}^{i+1} \\ \Delta\sigma_{z,n+1}^{i+1} \\ \Delta\sigma_{\theta,n+1}^{i+1} \end{Bmatrix} \\ &= \left\{ \left( \frac{1}{E_r} - \frac{1}{E} \right) \Delta\sigma_{r,n+1}^i \right\} + \left\{ \left( \frac{1}{E_z} - \frac{1}{E} \right) d\sigma_{z,n+1}^{i+1} \right\} \\ &\quad \left\{ \left( \frac{1}{E_\theta} - \frac{1}{E} \right) \Delta\sigma_{\theta,n+1}^i \right\} + \left\{ \left( \frac{1}{E_\theta} - \frac{1}{E} \right) d\sigma_{\theta,n+1}^{i+1} \right\} \end{aligned} \quad (2.2.36)$$

となる。これによって(2.2.30)式中の未知量であるクラック歪み増分  $\{\Delta\varepsilon_{n+1}^{crk,i+1}\}$  が消去された。

したがって、(2.2.30)式は次のように変換することができる。

$$\begin{aligned} & [C_{n+\theta}^i] \{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} - [B] \{\Delta u_{n+1}^{i+1}\} + \{\Delta \varepsilon_{n+1}^0\} \\ & + \left\{ [\tilde{C}_{n+\theta}^i] - [C_{n+\theta}^i] \right\} (\{\sigma_{n+1}^i\} + \{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} - \{\sigma_n\}) + \{\Delta \varepsilon_{n+1}^{P,i+1}\} + \{\Delta \varepsilon_{n+1}^{c,i+1}\} + [C_{n+\theta}^i] (\{\sigma_{n+1}^i\} - \{\sigma_n\}) = 0 \end{aligned}$$

より、

$$[\tilde{C}_{n+\theta}^i] \{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} - [B] \{\Delta u_{n+1}^{i+1}\} + \{\Delta \varepsilon_{n+1}^0\} + \{\Delta \varepsilon_{n+1}^{P,i+1}\} + \{\Delta \varepsilon_{n+1}^{c,i+1}\} + [\tilde{C}_{n+\theta}^i] (\{\sigma_{n+1}^i\} - \{\sigma_n\}) = 0 \quad (2.2.37)$$

となる。

**調整パラメータ FRELOC,EPSRLZ (力学計算のみ)**

リロケーションひずみ  $\varepsilon^{rel}$  は、径方向には hot stand-by における半径ギャップ幅を FRELOC 倍した値をペレット半径で割ったものとして与え、軸方向には EPSRLZ で直接与える。なお、FRELOC の標準値は 0.5、EPSRLZ の標準値は 0.003 である。

**調整パラメータ FACR,FACZ**  $E_i = E$  となるのは  $\varepsilon_i - \varepsilon_i^0 = -\varepsilon_i^{rel}$  の場合であるが、

パラメータ FACR, FACZ を用いて径および周方向については  $\varepsilon_i - \varepsilon_i^0 = -\varepsilon_i^{rel} \cdot FACR$ 、軸方向については  $\varepsilon_i - \varepsilon_i^0 = -\varepsilon_i^{rel} \cdot FACZ$  の様に調整することができる。  
FACR, FACZ の標準値は 1 である。

## 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。

$$\dot{\varepsilon}^c = f(\bar{\sigma}, \bar{\varepsilon}^H, T, \phi, \dot{F}) \quad (2.2.38)$$

ここで、

- $\dot{\varepsilon}^c$  : 相当クリープひずみ速度(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)
- $\phi$  : 高速中性子束( $n/m^2 \cdot s$ ) (ペレットでは無関係)
- $\dot{F}$  : 核分裂速度(fission/ $m^3 \cdot s$ ) (被覆管では無関係)

である。

クリープ硬化パラメータ  $\bar{\varepsilon}^H$  が相当クリープひずみ  $\bar{\varepsilon}^c$  に等しいと仮定すると、硬化パラメータの変化率は、

$$\dot{\varepsilon}^H = f(\bar{\sigma}, \bar{\varepsilon}^H, T, \phi, \dot{F}) \quad (2.2.39)$$

と書ける。(2.2.38)式は単軸応力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、

$$\{\dot{\varepsilon}^c\} = \{\beta(\{\sigma\}, \bar{\varepsilon}^H)\} \quad (2.2.40)$$

と書ける。ただし、 $T, \phi$  および  $F$  は既知パラメータとして扱われる所以省略した。

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

$$\{\Delta\varepsilon_{n+1}^c\} = \Delta t_{n+1} \{\dot{\varepsilon}_{n+\theta}^c\} = \Delta t_{n+1} \{\beta(\{\sigma_{n+\theta}\}, \bar{\varepsilon}_{n+\theta}^H)\} \quad (2.2.41)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \{\sigma_{n+\theta}\} &= (1-\theta)\{\sigma_n\} + \theta\{\sigma_{n+1}\} \\ \bar{\varepsilon}_{n+\theta}^H &= (1-\theta)\bar{\varepsilon}_n^H + \theta\bar{\varepsilon}_{n+1}^H \end{aligned}$$

(ただし、 $0 \leq \theta \leq 1$ )

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、 $\theta$  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)。

本コードでは数値解の安定性を重んじて、 $\theta=1$  としている。

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  $i+1$  回目の反復を行つているとき((2.2.30)、(2.2.31)式参照)、クリープ速度ベクトルは次のように書くことができる。

ここで、クリープ式(2.2.40)は、流れ則(flow-rule)を用いて、各主方向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、

$$\{\dot{\varepsilon}^c\} = \dot{\bar{\varepsilon}}^c \left\{ \frac{d\bar{\sigma}}{d\sigma} \right\} = \frac{3f}{2\bar{\sigma}} \{\sigma'\} \quad (2.2.42)$$

と書くことができる。ただし、 $\bar{\sigma}$  は、相当応力であり、後述の(2.2.54)式において定義される。

また、 $\{\sigma'\}$  は偏差応力ベクトルであり、

$$\{\sigma'\} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{2\sigma_r - \sigma_z - \sigma_\theta}{3} + 2\alpha(\sigma_r + \sigma_z + \sigma_\theta) \\ \frac{2\sigma_z - \sigma_\theta - \sigma_r}{3} + 2\alpha(\sigma_r + \sigma_z + \sigma_\theta) \\ \frac{2\sigma_\theta - \sigma_r - \sigma_z}{3} + 2\alpha(\sigma_r + \sigma_z + \sigma_\theta) \end{array} \right\}$$

で与えられ、各主応力成分の平均値からの偏差を表す。

よって、

$$\begin{aligned} \{\dot{\varepsilon}_{n+\theta}^{c,i+1}\} &= \left\{ \beta \left( \{\sigma'_{n+\theta}\} + \theta \{d\sigma_{n+1}^{i+1}\}, \bar{\varepsilon}_{n+\theta}^{H,i} + \theta d\bar{\varepsilon}_{n+1}^{H,i+1} \right) \right\} \\ &= \frac{3f \left( \bar{\sigma} \left( \{\sigma'_{n+\theta}\} + \theta \{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} \right), \bar{\varepsilon}_{n+\theta}^{H,i} + \theta d\bar{\varepsilon}_{n+1}^{H,i+1} \right)}{2\bar{\sigma} \left( \{\sigma'_{n+\theta}\} + \theta \{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} \right)} \\ &\quad \times \left\{ \sigma' \left( \{\sigma'_{n+\theta}\} + \theta \{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} \right) \right\} \end{aligned} \quad (2.2.43)$$

が成り立つ。ここで、 $\{d\sigma_{n+1}^{i+1}\}$  および  $\{d\bar{\varepsilon}_{n+1}^{H,i+1}\}$  は反復による修正量である。

(2.2.43)式は、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。

$$\begin{aligned} \{\dot{\varepsilon}_{n+\theta}^{c,i+1}\} &= \frac{3}{2\bar{\sigma}_{n+\theta}^i} f_{n+\theta}^i \{\sigma'_{n+\theta}^i\} - \frac{3}{2(\bar{\sigma}_{n+\theta}^i)^2} f_{n+\theta}^i \{\sigma'_{n+\theta}^i\} \left[ \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \theta \{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} \\ &\quad + \frac{3}{2\bar{\sigma}_{n+\theta}^i} f_{n+\theta}^i \left[ \frac{\partial \sigma'}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \theta \{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} + \frac{3}{2\bar{\sigma}_{n+\theta}^i} \{\sigma'_{n+\theta}^i\} \left( \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right)_{n+\theta}^i \left[ \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \theta \{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} \\ &\quad + \frac{3}{2\bar{\sigma}_{n+\theta}^i} \{\sigma'_{n+\theta}^i\} \left( \frac{\partial f}{\partial \bar{\varepsilon}^H} \right)_{n+\theta}^i \theta d\bar{\varepsilon}_{n+1}^{H,i+1} \\ &= \{\dot{\varepsilon}_{n+\theta}^{c,i}\} + \frac{3}{2\bar{\sigma}_{n+\theta}^i} \left( \left( \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right)_{n+\theta}^i - \frac{f_{n+\theta}^i}{\bar{\sigma}_{n+\theta}^i} \right) \left[ \sigma' \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \theta \{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} \\ &\quad + \frac{3f_{n+\theta}^i}{2\bar{\sigma}_{n+\theta}^i} \left[ \frac{\partial \sigma'}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \theta \{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} + \frac{3}{2\bar{\sigma}_{n+\theta}^i} \{\sigma'_{n+\theta}^i\} \left( \frac{\partial f}{\partial \bar{\varepsilon}^H} \right)_{n+\theta}^i \theta d\bar{\varepsilon}_{n+1}^{H,i+1} \end{aligned} \quad (2.2.44)$$

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

$$\begin{aligned} \left\{\dot{\varepsilon}_{n+\theta}^{c,i+1}\right\} &= \left\{\dot{\varepsilon}_{n+\theta}^{c,i}\right\} \\ &+ \frac{9}{4(\bar{\sigma}_{n+\theta}^i)^2} \left( \left( \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right)_{n+\theta}^i - \frac{f_{n+\theta}^i}{\bar{\sigma}_{n+\theta}^i} \right) \left[ \sigma'_i \sigma'_j \right]_{n+\theta}^i \theta \left\{ d\sigma_{n+1}^{i+1} \right\} \\ &+ \frac{3f_{n+\theta}^i}{2\bar{\sigma}_{n+\theta}^i} \left[ \frac{\partial \sigma'}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \theta \left\{ d\sigma_{n+1}^{i+1} \right\} + \frac{3}{2\bar{\sigma}_{n+\theta}^i} \left\{ \sigma'_{n+\theta}^i \right\} \left( \frac{\partial f}{\partial \bar{\varepsilon}^H} \right)_{n+\theta}^i \theta d\bar{\varepsilon}_{n+1}^{H,i+1} \end{aligned} \quad (2.2.45)$$

一方、クリープ硬化増分は(2.2.39)式より、次のように表される。

$$\begin{aligned} \Delta \bar{\varepsilon}_{n+\theta}^{H,i+1} &= \Delta t_{n+1} f \left( \bar{\sigma}_{n+\theta}^{i+1}, \bar{\varepsilon}_{n+\theta}^{H,i+1} \right) \\ &= \Delta t_{n+1} f \left( \bar{\sigma} \left( \left\{ \sigma'_{n+\theta}^i \right\} + \theta \left\{ d\sigma_{n+1}^{i+1} \right\} \right), \bar{\varepsilon}_{n+\theta}^{H,i} + \theta d\bar{\varepsilon}_{n+1}^{H,i+1} \right) \end{aligned}$$

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。

$$\begin{aligned} \Delta \bar{\varepsilon}_{n+\theta}^{H,i+1} &= \Delta \bar{\varepsilon}_{n+\theta}^{H,i} + d\bar{\varepsilon}_{n+1}^{H,i+1} \\ &= \Delta t_{n+1} f_{n+\theta}^i + \theta \Delta t_{n+1} \left( \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right)_{n+\theta}^i \left| \frac{\partial \sigma}{\partial \sigma} \right|_{n+\theta}^i \left\{ d\sigma_{n+1}^{i+1} \right\} \\ &\quad + \theta \Delta t_{n+1} \left( \frac{\partial f}{\partial \bar{\varepsilon}^H} \right)_{n+\theta}^i d\bar{\varepsilon}_{n+1}^{H,i+1} \end{aligned} \quad (2.2.46)$$

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

$$d\bar{\varepsilon}_{n+1}^{H,i+1} = \frac{\theta \Delta t_{n+1} \left( \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right)_{n+\theta}^i \left| \frac{\partial \sigma}{\partial \sigma} \right|_{n+\theta}^i \left\{ d\sigma_{n+1}^{i+1} \right\}}{1 - \theta \Delta t_{n+1} \left( \frac{\partial f}{\partial \bar{\varepsilon}^H} \right)_{n+\theta}^i} \quad (2.2.47)$$

これを(2.2.45)式に代入し整理すると、

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

ここで、

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

$$F_2 = \frac{3f_{n+\theta}^i}{2\bar{\sigma}_{n+\theta}^i} \quad (2.2.50)$$

である。

一方、未知量のクリープひずみ増分は次のように与えられる。

$$\begin{aligned}\{\Delta\varepsilon_{n+1}^{c,i+1}\} &= \Delta t_{n+1} \left\{ \dot{\varepsilon}_{n+\theta}^{c,i+1} \right\} \\ &= \left\{ \Delta\varepsilon_{n+1}^{c,i} \right\} + \left[ C_{n+\theta}^{c,i} \right] \left\{ d\sigma_{n+1}^{i+1} \right\}\end{aligned}\quad (2.2.51)$$

ただし、

$$\left[ C_{n+\theta}^{c,i} \right] = \theta \Delta t_{n+1} \left( F_1 \left[ \sigma_i' \sigma_j' \right]_{n+\theta}^i + F_2 \left[ \frac{\partial \sigma'}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \right)$$

である。これによって、(2.2.37)式中の  $\{\Delta\varepsilon_{n+1}^{c,i+1}\}$  が消去された。(2.2.51)式を(2.2.37)式に代入し整理すると次式が得られる。

$$\begin{aligned}\left\{ d\sigma_{n+1}^{i+1} \right\} &= \left[ \hat{D}_{n+\theta}^i \right] \left( [B] \left\{ \Delta u_{n+1}^{i+1} \right\} - \left[ C_{n+\theta}^i \right] \left( \left\{ \sigma_{n+1}^i \right\} - \left\{ \sigma_n \right\} \right) \right. \\ &\quad \left. - \left\{ \Delta\varepsilon_{n+1}^0 \right\} - \left\{ \Delta\varepsilon_{n+1}^{C,i} \right\} - \left\{ \Delta\varepsilon_{n+1}^{P,i+1} \right\} \right)\end{aligned}\quad (2.2.52)$$

ただし、

$$\begin{aligned}\left[ \hat{D}_{n+1}^i \right] &= \left( \left[ C_{n+1}^i \right] + \left[ C_{n+1}^{c,i} \right] \right)^{-1} \\ \left\{ \Delta u_{n+1}^{i+1} \right\} &= \left\{ u_{n+1}^i \right\} + \left\{ du_{n+1}^{i+1} \right\} - \left\{ u_n \right\},\end{aligned}$$

である。 $\hat{\cdot}$ は見かけの剛性を意味する。

## 2.2.5 塑 性

被覆管及びペレットの降伏条件は、共通して次のように表される。

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

ここで、

- $\bar{\varepsilon}^P$  : 相当塑性ひずみ
- $T$  : 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。（ただし、剪断成分は扱っていない）

$$\begin{aligned}h &= \left[ \frac{3}{2(F+G+H)} \left\{ H(\sigma_r - \sigma_z)^2 + F(\sigma_z - \sigma_\theta)^2 + G(\sigma_\theta - \sigma_r)^2 \right\} \right. \\ &\quad \left. + 3\alpha(\sigma_r + \sigma_z + \sigma_\theta)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \equiv \bar{\sigma}\end{aligned}\quad (2.2.54)$$

ここで、

$H, F, G$  : 異方性係数（ただし、ペレットでは等方性を仮定して  $H=F=G=1$  とする）

$\alpha$  : ペレットホットプレスパラメータ（ただし被覆管では  $\alpha=0$  とする）<sup>(36)</sup>

である。

調整パラメータ H0(2),F0(2),G0(2)

被覆管の異方性係数 H,F,G は H0(2),F0(2),G0(2) で指定する。標準値はいずれも 1.0 である。

調整パラメータ IHOT IHOT=1 の場合、ペレットホットプレスパラメータ  $\alpha$  を  
ポロシティ  $p$  の関数として以下のように定義する。

$$\alpha = \text{BETAX} \frac{p}{1 - D_0}$$

ここで  $p$  : ペレット内部でのポロシティ

$D_0$  : 初期理論密度比

BETAX : ホットプレスパラメータの初期値

調整パラメータ BETAX IHOT=0 の場合、ペレットホットプレスパラメータ  $\alpha$  は  
BETAX で指定する。BETAX の標準値は 0.002 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。

$$\{\Delta\bar{\varepsilon}_{n+1}^P\} = \Delta\bar{\varepsilon}_{n+1}^P \left\{ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right\}_{n+\theta} \quad (2.2.55)$$

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。

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

$$\{\Delta\bar{\varepsilon}_{n+1}^{P,i+1}\} = \Delta\bar{\varepsilon}_{n+1}^{P,i+1} \left\{ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right\}_{n+\theta}^i \quad (2.2.57)$$

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

$$h(\{\sigma_n\} + \left[ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \{\Delta\sigma_{n+1}^{i+1}\}) = K(\bar{\varepsilon}_n^P, T_n) + \left( \frac{\partial K}{\partial \bar{\varepsilon}^P} \right)_{n+\theta}^i \Delta\bar{\varepsilon}_{n+1}^{P,i+1} + \left( \frac{\partial K}{\partial T} \right)_{n+\theta}^i \Delta T_{n+1} \quad (2.2.58)$$

次の関係、

$$\{\Delta\sigma_{n+1}^{i+1}\} = \{\Delta\sigma_{n+1}^i\} + \{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} - \{\sigma_n\} \quad (2.2.59)$$

を(2.2.58)式に代入し整理すると、

$$\begin{aligned} \Delta\bar{\varepsilon}_{n+1}^{P,i+1} = & \frac{1}{H_{n+\theta}^i} \left( \left[ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \left( \{\sigma_{n+1}^i\} - \{\sigma_n\} \right) + h(\{\sigma_n\}) - K(\bar{\varepsilon}_n^P, T_n) \right. \\ & \left. - \left( \frac{\partial K}{\partial T} \right)_{n+\theta} \Delta T_{n+1} + \left[ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} \right) \end{aligned} \quad (2.2.60)$$

ここで、

$$H_{n+\theta}^i = \left( \frac{\partial K}{\partial \bar{\varepsilon}_P} \right)_{n+\theta}^i \quad (2.2.61)$$

である。

(2.2.60)式に(2.2.52)式を代入すると、

$$\begin{aligned} H_{n+1}^i \Delta\bar{\varepsilon}_{n+1}^{P,i+1} + \left( \frac{\partial K}{\partial T} \right)_{n+\theta} \Delta T_{n+1} - h(\{\sigma_n\}) + K(\bar{\varepsilon}_n^P, T_n) \\ = \left[ \frac{\partial \sigma}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \left( \{\sigma_{n+1}^i\} - \{\sigma_n\} \right) \\ + \left[ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \left[ \hat{D}_{n+\theta}^i \left[ [B] \{\Delta u_{n+1}^{i+1}\} - [\tilde{C}_{n+\theta}^i] (\{\sigma_{n+1}^i\} - \{\sigma_n\}) \right] - \{\Delta \varepsilon_{n+1}^o\} - \Delta\bar{\varepsilon}_{n+1}^{P,i+1} \left[ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \right] \end{aligned} \quad (2.2.62)$$

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

$$\begin{aligned} \Delta\bar{\varepsilon}_{n+1}^{P,i+1} = & \frac{\left[ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \left[ \hat{D}_{n+\theta}^i \left[ [B] \{\Delta u_{n+1}^{i+1}\} - [\tilde{C}_{n+\theta}^i] (\{\sigma_{n+1}^i\} - \{\sigma_n\}) \right] - \{\Delta \varepsilon_{n+1}^o\} - \{\Delta \varepsilon_{n+1}^{c,i}\} \right]}{H_{n+\theta}^i + \left[ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \left[ \hat{D}_{n+\theta}^i \left\{ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right\}_{n+\theta}^i \right]} \\ & + \frac{\left[ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \left( \{\sigma_{n+1}^i\} - \{\sigma_n\} \right) - \left( \frac{\partial K}{\partial T} \right)_{n+\theta} \Delta T_{n+1} - h(\{\sigma_n\}) + K(\bar{\varepsilon}_n^P, T_n)}{H_{n+\theta}^i + \left[ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \left[ \hat{D}_{n+\theta}^i \left\{ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right\}_{n+\theta}^i \right]} \end{aligned} \quad (2.2.63)$$

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。

$$\begin{aligned} \{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} = & \left[ \hat{D}_{n+\theta}^i \left[ [B] \{\Delta u_{n+1}^{i+1}\} - [\tilde{C}_{n+\theta}^i] (\{\sigma_{n+1}^i\} - \{\sigma_n\}) \right] - \{\Delta \varepsilon_{n+1}^o\} - \{\Delta \varepsilon_{n+1}^{c,i}\} \right] \\ & - \frac{\left[ \hat{D}_{n+\theta}^i \left\{ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right\}_{n+\theta}^i \right] \left[ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \left[ \hat{D}_{n+\theta}^i \right]}{H_{n+\theta}^i + \left[ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \left[ \hat{D}_{n+\theta}^i \left\{ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right\}_{n+\theta}^i \right]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times \left( [B] \left\{ \Delta u_{n+1}^{i+1} \right\} - \left[ \tilde{C}_{n+\theta}^i \right] \left( \left\{ \sigma_{n+1}^i \right\} - \left\{ \sigma_n \right\} \right) - \left\{ \Delta \varepsilon_{n+1}^o \right\} - \left\{ \Delta \varepsilon_{n+1}^{c,i} \right\} \right) \\
& - \frac{\left[ \hat{D}_{n+\theta}^i \right] \left\{ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right\}_{n+\theta}^i \left( \left[ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \left( \left\{ \sigma_{n+1}^i \right\} - \left\{ \sigma_n \right\} \right) - \left( \frac{\partial K}{\partial T} \right)_{n+\theta} \Delta T_{n+1} - h(\left\{ \sigma_n \right\}) + K(\bar{\varepsilon}_n^p, T_n) \right)}{H_{n+\theta}^{i,i} + \left[ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \left[ \hat{D}_{n+\theta}^i \right] \left\{ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right\}_{n+\theta}^i} \\
& \quad (2.2.64)
\end{aligned}$$

これを整理すると次のようになる。

$$\begin{aligned}
\left\{ d\sigma_{n+1}^{i+1} \right\} &= \left[ \hat{D}_{n+\theta}^{p,i} \right] \left( [B] \left\{ \Delta u_{n+1}^{i+1} \right\} - \left[ \tilde{C}_{n+\theta}^i \right] \left( \left\{ \sigma_{n+1}^i \right\} - \left\{ \sigma_n \right\} \right) - \left\{ \Delta \varepsilon_{n+1}^o \right\} - \left\{ \Delta \varepsilon_{n+1}^{c,i} \right\} \right) \\
& + \left\{ S_{n+\theta}^i \right\} \Delta T_{n+1} - \left\{ Z_1 \right\} - \left\{ Z_2 \right\}
\end{aligned} \quad (2.2.65)$$

ここで、

$$\left[ \hat{D}_{n+\theta}^{p,i} \right] = \left[ \hat{D}_{n+\theta}^i \right] - \frac{\left[ \hat{D}_{n+\theta}^i \right] \left[ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \left[ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \left[ \hat{D}_{n+\theta}^i \right]}{H_{n+\theta}^{i,i} + \left[ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \left[ \hat{D}_{n+\theta}^i \right] \left\{ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right\}_{n+\theta}^i} \quad (2.2.66)$$

$$\left\{ S_{n+\theta}^i \right\} = \frac{\left[ \hat{D}_{n+\theta}^i \right] \left\{ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right\}_{n+\theta}^i \left( \frac{\partial K}{\partial T} \right)_{n+\theta}}{H_{n+\theta}^{i,i} + \left[ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \left[ \hat{D}_{n+\theta}^i \right] \left\{ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right\}_{n+\theta}^i} \quad (2.2.67)$$

$$\left\{ Z_1 \right\} = \frac{\left[ \hat{D}_{n+\theta}^i \right] \left\{ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right\}_{n+\theta}^i \left[ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \left( \left\{ \sigma_{n+1}^i \right\} - \left\{ \sigma_n \right\} \right)}{H_{n+\theta}^{i,i} + \left[ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \left[ \hat{D}_{n+\theta}^i \right] \left\{ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right\}_{n+\theta}^i} \quad (2.2.68)$$

$$\left\{ Z_{21} \right\} = \frac{\left[ \hat{D}_{n+\theta}^i \right] \left\{ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right\}_{n+\theta}^i \left[ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \left( h(\left\{ \sigma_n \right\}) - K(\bar{\varepsilon}_n^p, T_n) \right)}{H_{n+\theta}^{i,i} + \left[ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \left[ \hat{D}_{n+\theta}^i \right] \left\{ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right\}_{n+\theta}^i} \quad (2.2.69)$$

である。これによって(2.2.30)式中の未知量  $\left\{ \Delta \varepsilon_{n+1}^{p,i+1} \right\}$  が消去された。したがって、(2.2.65)式がペレットのクラック、ペレットと被覆管のクリープ及び塑性に対する未知量をすべて消去した結果得られ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 剛性方程式の導出

ペレットクラック、クリープおよび塑性をすべて既知量で表記した構成方程式(2.2.65)式を再記する。

$$\begin{aligned} \{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} = & [\hat{D}_{n+\theta}^{P,i}] \left[ B \right] \{ \Delta u_{n+1}^{i+1} \} - \left[ \tilde{C}_{n+\theta}^i \right] \left( \{\sigma_{n+1}^i\} - \{\sigma_n\} \right) - \left\{ \Delta \varepsilon_{n+1}^o \right\} - \left\{ \Delta \varepsilon_{n+1}^{c,i} \right\} \\ & + \left\{ S_{n+\theta}^i \right\} \Delta T_{n+1} - \{Z_1\} - \{Z_2\} \end{aligned} \quad (2.2.65)$$

(2.2.65)式を平衡条件式(2.2.31)式に代入し整理すると次の形の剛性方程式が求まる。

$$[K_{n+\theta}^i] \{ \Delta u_{n+1}^{i+1} \} = \{ \Delta \hat{F}_{n+1}^i \} \quad (2.2.70)$$

(2.2.70)式で示した剛性方程式を各要素に適用するために、各項を次式のように要素体積で積分して決定する。

$$[K_{n+\theta}^i] = 2\pi \int \int [B]^T [\hat{D}_{n+\theta}^{P,i}] [B] r dr dz \quad (2.2.71)$$

$$\begin{aligned} \{ \Delta \hat{F}_{n+1}^i \} = & 2\pi \int \int [B]^T [\hat{D}_{n+\theta}^{P,i}] \left[ \tilde{C}_{n+\theta}^i \right] \left( \{\sigma_{n+1}^i\} - \{\sigma_n\} \right) \\ & + \left\{ \Delta \varepsilon_{n+1}^o \right\} + \left\{ \Delta \varepsilon_{n+1}^{c,i} \right\} r dr dz \\ & - 2\pi \int \int [B]^T \left( \left\{ S_{n+\theta}^i \right\} \Delta T_{n+1} - \{Z_1\} - \{Z_2\} \right) r dr dz \\ & + \{F_{n+1}\} - 2\pi \int \int [B]^T (\sigma_{n+1}^i) r dr dz \end{aligned} \quad (2.2.72)$$

ただし、要素の剛性方程式の右辺を  $\{\Delta \hat{F}_{n+1}^i\}$  と表記したのは、(2.2.70)式で示した剛性方程式から求められる解は変位増分  $\{\Delta u_{n+1}^{i+1}\}$  であるので、右辺は荷重増分ベクトルとなるからである。ただし、 $\hat{\cdot}$  記号は収束計算中の仮の値 ( $\Delta F_{n+1}$ ) であることを意味する。

次に、上下プレナムのバネ要素に対する取り扱い方法を説明する。上下プレナムのバネ要素に対しては、自由度は軸方向のみとし、弾性ひずみおよび熱ひずみのみを考慮する。したがって、(2.2.29)式において

$$\{ \Delta \varepsilon_{n+1}^p \} = 0, \quad \{ \Delta \varepsilon_{n+1}^c \} = 0$$

として

$$[C_{n+\theta}] \{ \Delta \sigma_{n+1} \} - [B] \{ \Delta u_{n+1} \} + \{ \Delta \varepsilon_{n+1}^o \} = 0 \quad (2.2.73)$$

を得る。さらに、(2.2.73)式は、

$$[C_{n+\theta}] \left( \{\sigma_{n+1}\} + \{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} - \{\sigma_n\} \right) - [B] \{ \Delta u_{n+1}^{i+1} \} + \{ \Delta \varepsilon_{n+1}^o \} = 0$$

と書くことができる。ここで  $[D_{n+\theta}] = [C_{n+\theta}]^{-1}$  とおくと、

$$\{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} = [D_{n+\theta}][B]\{\Delta u_{n+1}^{i+1}\} - \{\Delta \varepsilon_{n+1}^o\} - [C_{n+\theta}]\{\sigma_{n+1}^i\} - \{\sigma_n\}$$

となる。これを平衡方程式(2.2.31)式に代入すれば、

$$\begin{aligned} & \int_v [B]^T [D_{n+\theta}] ([B]\{\Delta u_{n+1}^{i+1}\} - \{\Delta \varepsilon_{n+1}^o\} - [C_{n+\theta}]\{\sigma_{n+1}^i\} - \{\sigma_n\})) dV \\ & + \int_v [B]^T \{\sigma_{n+1}^i\} dV = \{F_{n+1}\} \end{aligned} \quad (2.2.74)$$

となる。これが上下プレナムの剛性方程式である。ここで未知量を左辺にまとめれば、

$$\begin{aligned} & \int_v [B]^T [D_{n+\theta}] [B]\{\Delta u_{n+1}^{i+1}\} dV \\ & = \{F_{n+1}\} + \int_v [B]^T [D_{n+\theta}]\{\Delta \varepsilon_{n+1}^o\} dV + \int_v [B]^T (\{\sigma_{n+1}^i\} - \{\sigma_n\}) dV \\ & \quad - \int_v [B]^T \{\sigma_{n+1}^i\} dV \end{aligned} \quad (2.2.75)$$

となり、結局、

$$\begin{aligned} \int_v [B]^T [D_{n+\theta}] [B]\{\Delta u_{n+1}^{i+1}\} dV & = \{F_{n+1}\} + \int_v [B]^T [D_{n+\theta}]\{\Delta \varepsilon_{n+1}^o\} dV \\ & \quad - \int_v [B]^T \{\sigma_n\} dV \end{aligned} \quad (2.2.76)$$

を得る。(2.2.76)式は、

$$\begin{aligned} & [K'_{n+\theta}]\{\Delta u_{n+1}^{i+1}\} = \{\Delta \hat{F}_{n+1}^i\} \\ & [K'_{n+\theta}] = \int_v [B]^T [D_{n+\theta}] [B] dV \\ & \{\Delta \hat{F}_{n+1}^i\} = \{F_{n+1}\} - \int_v [B]^T [D_{n+\theta}]\{\Delta \varepsilon_{n+1}^o\} dV - \int_v [B]^T \{\sigma_n\} dV \end{aligned} \quad (2.2.77)$$

となる。したがって、(2.2.77)式が、未知量を消去した上下プレナムの剛性方程式である。ただし(2.2.77)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、

$$F_{n+1} = \pi r_{ci}^2 P_{gas,n+1} - \pi r_{co}^2 P_{water,n+1} \quad (2.2.78)$$

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、(2.2.76)式の右辺第3項は

$$\int [B]^T \{\sigma_n\} dV = k(v_{pl,n} - v_{u,n}) \quad (2.2.79)$$

で与えられる。ここで、

$k$  : バネ定数 (N/m)

$v_{pl,n}$  : 第  $n$  ステージでのプレナム上端部変位 (m)

$v_{u,n}$  : 第  $n$  ステージでのペレット (または被覆管) 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。

## 2.2.7 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。

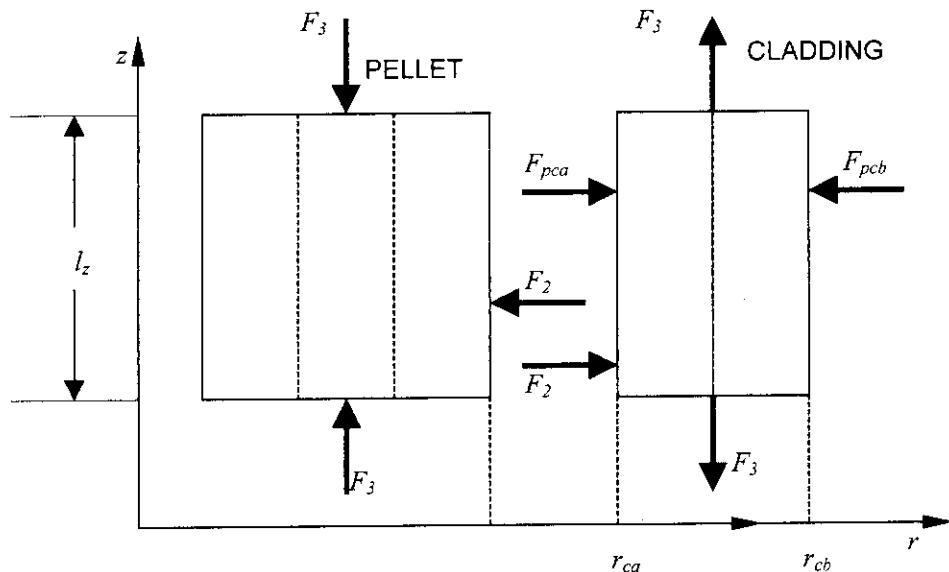


図 2.33 燃料・被覆管に作用する力

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

$F_{pcb}$  : クーラント圧

である。

ただし、ペレットと被覆管の間の接触力は、2.1.3 項とは独立に以下の項で評価し、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、ブ

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 に示すペレット 3 層、被覆管 2 層の場合を例にとって説明し、全体マトリクスの定式化を行う。

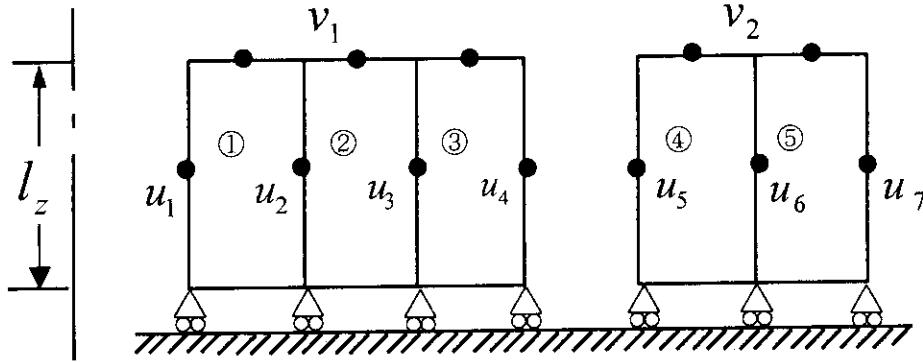


図 2.34 解析モデルの一例

図 2.34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(2.2.70)、(2.2.72)式および上下プレナムの剛性方程式(2.2.77)を以下に再記する。

$$[K_{n+\theta}^i] \{ \Delta u_{n+1}^{i+1} \} = \{ \Delta \hat{F}_{n+1}^i \} \quad (2.2.70)$$

$$\begin{aligned} \{ \Delta \hat{F}_{n+1}^i \} &= 2\pi \int \int [B]^T [\hat{D}_{n+\theta}^{p,i}] \{ \tilde{C}_{n+\theta}^i \} (\{ \sigma_{n+1}^i \} - \{ \sigma_n \}) \\ &\quad + \{ \Delta \varepsilon_{n+1}^o \} + \{ \Delta \varepsilon_{n+1}^{c,i} \} r dr dz \\ &\quad - 2\pi \int \int [B]^T (\{ S_{n+\theta}^i \} \Delta T_{n+1} - \{ Z_1 \} - \{ Z_2 \}) r dr dz \\ &\quad + \{ F_{n+1} \} - 2\pi \int \int [B]^T (\sigma_{n+1}^i) r dr dz \end{aligned} \quad (2.2.72)$$

$$\begin{aligned} [K_{n+\theta}^i] \{ \Delta u_{n+1}^{i+1} \} &= \{ \Delta \hat{F}_{n+1}^i \} \\ [K_{n+\theta}^i] &= \int_v [B]^T [\hat{D}_{n+\theta}^{p,i}] [B] dV \\ \{ \Delta \hat{F}_{n+1}^i \} &= \{ F_{n+1} \} - \int_v [B]^T [D_{n+\theta}] \{ \Delta \varepsilon_{n+1}^o \} dV - \int_v [B]^T \{ \sigma_n \} dV \end{aligned} \quad (2.2.77)$$

これらの方程式は Newton-Raphson 法の繰り返しが終了した状態では、繰り返しの添字  $i$  を省略して、

$$[K_{n+\theta}] \{ \Delta u_{n+1} \} = \{ \Delta F_{n+1} \} \quad (2.2.80)$$

と書ける。さらに以降の議論のために(2.2.80)式を次式のように表すこととする。

$$[B_{ee}] \{ \Delta u_{n+1} \} = \{ F_{n+1} \} + \{ B_{et,n+1} \} \quad (2.2.81)$$

ここで、

$$\begin{aligned} [B_{ee}] &= [K_{n+\theta}] \\ \{B_{et,n+1}\} &= \{\Delta F_{n+1}\} - \{F_{n+1}\} \end{aligned}$$

である。

以上で要素マトリックスが作成できたので、次に全体マトリックスの作成方法を説明する。

図 2.36 を例にとってセグメントの全体マトリックスを表記すると、

$$\left[ \begin{array}{ccccccc|c} B_{11}^1 & B_{12}^1 & 0 & 0 & 0 & 0 & B_{13}^1 & 0 \\ B_{21}^1 & B_{22}^1 + B_{11}^2 & B_{12}^1 & 0 & 0 & 0 & B_{23}^1 + B_{13}^2 & 0 \\ 0 & B_{21}^2 & B_{22}^1 + B_{11}^3 & B_{12}^3 & 0 & 0 & B_{23}^2 + B_{13}^2 & 0 \\ 0 & 0 & B_{21}^3 & B_{22}^3 & 0 & 0 & B_{23}^3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & B_{11}^4 & B_{12}^4 & 0 & B_{13}^4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & B_{21}^4 & B_{22}^4 + B_{12}^5 & B_{12}^5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & B_{21}^5 & B_{22}^5 & 0 \\ B_{31}^1 & B_{32}^1 + B_{31}^2 & B_{32}^2 + B_{31}^3 & B_{21}^3 & 0 & 0 & B_{33}^1 + B_{33}^2 + B_{33}^3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & B_{31}^4 & B_{32}^4 + B_{31}^5 & B_{32}^5 & 0 \\ \end{array} \right] \left[ \begin{array}{c} \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \\ \Delta u_3 \\ \Delta u_4 \\ \Delta u_5 \\ \Delta u_6 \\ \Delta u_7 \\ \Delta v_1 \\ \Delta v_2 \end{array} \right]$$

$$= \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -F_{pca} \\ 0 \\ 0 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} B_{et,1}^1 \\ B_{et,2}^1 + B_{et,1}^2 \\ B_{et,2}^2 + B_{et,1}^3 \\ B_{et,2}^3 \\ B_{et,1}^4 \\ B_{et,2}^4 + B_{et,1}^5 \\ B_{et,2}^5 \\ B_{et,3}^1 + B_{et,3}^2 + B_{et,3}^3 \\ B_{et,3}^4 + B_{et,3}^5 \end{array} \right\} \quad (2.2.82)$$

と書ける。ただし、 $B^*$ の添え字\*は、図 2.34 における要素番号を表す。(2.2.82)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。したがって、セグメントの全体マトリックスの境界条件としては、ペレットと被覆管の接触状態に対応した境界条件を付加する必要がある。以下に、ペレットと被覆管の接触のある場合の取り扱い方法について示す。

### (1) 固着の場合

ペレット最外層セグメントの変位  $\Delta u_4$  と被覆管最内層セグメントの変位  $\Delta u_5$  を変位ベクトルマトリックスの同じ場所に入れる。したがって(2.2.82)式は次のように与える。

$$\begin{bmatrix} & & & & 0 \\ & & & & \vdots \\ & & & & \Delta u_4 = \Delta u_5 \\ & & & & \vdots \\ & & & & \Delta v_1 \\ & & & & \Delta v_2 \\ & & & & F_3 \\ \hline B_{8 \times 8} & & & & \left\{ \begin{array}{c} \\ \\ 0 \\ 1 \\ -1 \\ \hline 0 \quad \cdots \quad \cdots \quad 0 \quad 1 \quad -1 \end{array} \right\} & = & \left\{ \begin{array}{c} \\ \\ F_{n+1} \\ \hline 0 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} \\ \\ B_{et} \\ \hline 0 \end{array} \right\} \end{bmatrix} \quad (2.2.83)$$

(2.2.83)式を解いて軸力  $F_3$  を求める。

さらに、(2.3.82)式を下式に変えて全体マトリクスに組み込む。

$$\begin{bmatrix} B_{33}^{1+2+3} & 0 & -B_{31}^1 & -B_{32}^1 & -B_{32}^2 - B_{31}^3 & -B_{32}^3 & 0 & 0 & -B_{33}^{1+2+3} & 0 \\ 0 & B_{33}^{4+5} & 0 & 0 & 0 & -B_{31}^4 & -B_{32}^4 & -B_{31}^5 & 0 & -B_{33}^{4+5} \\ \hline -B_{31}^1 & 0 & & & & & & & B_{31}^1 & 0 \\ -B_{32}^1 - B_{31}^2 & 0 & & & & & & & B_{32}^1 + B_{31}^2 & 0 \\ -B_{32}^2 - B_{31}^3 & 0 & & & & & & & B_{32}^2 + B_{31}^3 & 0 \\ -B_{32}^3 & -B_{31}^4 & & & & & & & -B_{32}^3 & B_{31}^4 \\ 0 & -B_{31}^4 - B_{31}^5 & & & & & & & 0 & B_{32}^4 + B_{31}^3 \\ 0 & -B_{32}^5 & & & & & & & 0 & B_{32}^3 \\ \hline -B_{33}^{1+2+3} & 0 & B_{31}^1 & B_{32}^1 + B_{31}^2 & B_{32}^2 + B_{31}^3 & B_{32}^3 & 0 & 0 & B_{33}^{1+2+3} & 0 \\ 0 & -B_{33}^{4+5} & 0 & 0 & 0 & B_{31}^4 & B_{32}^4 + B_{31}^5 & B_{32}^5 & 0 & B_{33}^{4+5} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta u_{1,I}^L \\ \Delta u_{2,I}^L \\ \Delta u_{1,I} \\ \Delta u_{2,I} \\ \Delta u_{3,I} \\ \Delta u_{4,I} = \Delta u_{5,I} \\ \Delta u_{6,I} \\ \Delta u_{7,I} \\ \Delta u_{1,I}^U \\ \Delta u_{2,I}^U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{3,I} \\ -F_{3,I} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -F_{2,I} + F_{2,I} + F_{pca} \\ 0 \\ -F_{pca} \\ -F_{3,I} \\ F_{3,I} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \\ \\ \\ \\ \\ B_{et,I} \\ \\ \\ \\ \end{bmatrix} \quad (2.2.84)$$

ここで、(2.2.84)式の  $I$  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

(2.2.83)式に対応して次式で与える。

$$\begin{bmatrix} & 0 \\ & \vdots \\ & 0 \\ & 1 \\ & -1 \\ & 0 \\ & 0 \\ & \mu \\ & -\mu \\ \hline & 0 \cdots 0 1 -1 0 \cdots 0 0 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} & \vdots \\ & \Delta u_4 \\ & \Delta u_5 \\ & \vdots \\ & \Delta v_1 \\ & \Delta v_2 \\ \hline & F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & \vdots \\ & F_{n+1} \\ & \vdots \\ & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} & \vdots \\ & B_{el} \\ & \vdots \\ & 0 \end{bmatrix} \quad (2.2.85)$$

$\mu$  : 摩擦係数

(2.2.85)式を解いて  $F_2$  を求める。さらに、

$$F_3 = \mu F_2 \quad (2.2.86)$$

を与え、(2.2.84)式の形で全体マトリクスに組み込む。

なお、摩擦係数  $\mu$  については、 $F_2$  が受けているペレット側面積は  $2\pi r_o l_z$  であり、 $F_3$  が受けているのはペレット断面積  $\pi(r_o^2 - r_i^2)$  であるので、受けている面積が異なるために摩擦係数を補正する必要がある。すなわち、 $\mu$  に対し次の変換を行う。

$$\mu = \frac{r_o^2 - r_i^2}{2r_o l_z} \cdot \mu^* \quad (2.2.87)$$

ここで

$r_i$  : ペレット内半径

$r_o$  : ペレット外半径

$l_z$  : セグメント軸方向長さ

$\mu^*$  : 摩擦係数 (測定値)

調整パラメータ AMU  
摩擦係数  $\mu$  は AMU で指定する。  
AMU の標準値は 0.4 である。

である。

### (3) オープンギャップの場合

ギャップが開いている場合は接触力が発生しないので、(2.2.80)式で径方向接触力  $F_2$ 、軸方向接触力  $F_3$  をそれぞれ 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、ペレットスタックに関する全体マトリクスは以下の形になる。

$$\left[ \begin{array}{c} B_{ee}^1 \\ B_{ee}^2 \\ B_{ee}^3 \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \Delta u_{1,1}^L \\ \Delta u_{2,1}^L \\ \Delta u_1 \\ \vdots \\ \Delta u_{1,1}^U + \Delta u_{1,2}^L \\ \Delta u_{2,1}^L + \Delta u_{2,2}^L \\ \Delta u_2 \\ \vdots \\ \Delta u_{1,2}^U + \Delta u_{1,3}^L \\ \Delta u_{2,2}^U + \Delta u_{2,3}^L \\ \Delta u_3 \\ \vdots \\ \Delta u_{1,3}^U \\ \Delta u_{2,3}^U \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} F_{n+1} \\ B_{et,n+1} \end{array} \right]$$

(2.2.88)

(2.2.88)式を、以後の議論の煩雑さを避けるために、(2.2.80)式および(2.2.81)式のように書き直して

$$[B_{ee}] \{\Delta u\} = \{\Delta F\} \quad (2.2.89)$$

と表記しておく。

## 2.2.10 上下プレナム境界条件

上下プレナム部の存在は、力学的解析の境界条件の一つを与える。この条件が全体マトリックスにどのように反映するかについて、以下に説明する。

### (1) 上部プレナム

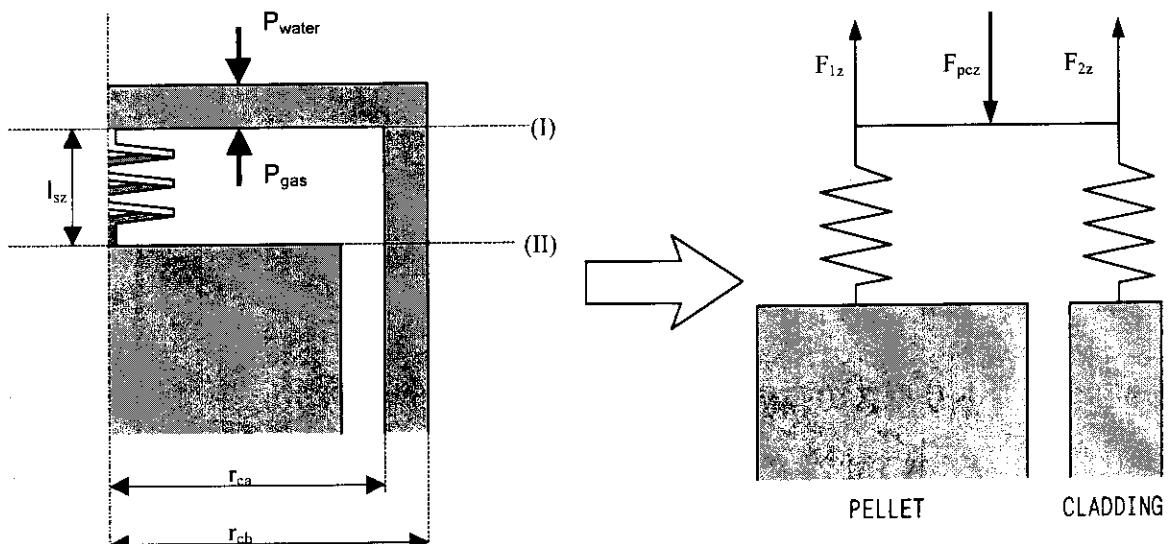


図 2.35 上部プレナム境界条件

プレナム圧力を  $P_{gas}$ , クーラント圧力を  $P_{water}$ , 被覆管の内半径を  $N_{ca}$ , 被覆管の外半径を  $r_{cb}$  とすると、境界 (I) の面での外力  $F_{pcz}$  は、

$$F_{pcz} = \pi r_{ca}^2 P_{gas} - \pi r_{cb}^2 P_{water} \quad (2.2.90)$$

である。この  $F_{pcz}$  は境界 (I) においてプレナムスプリングによる力  $F_{1z}$  と、プレナム部被覆管の弾性を軸方向スプリングとして模擬して得られた力  $F_{2z}$  の反力の和に等しい。

すなわち、

$$F_{pcz} = -(F_{1z} + F_{2z}) \quad (2.2.91)$$

である。ここで、プレナムスプリングバネ定数を  $k_s$ 、プレナム部被覆管の弾性のみかけのバネ定数を  $k_c$  とすると、 $F_{1z}, F_{2z}$  は以下のように書ける。

$$\left. \begin{aligned} F_{1z} &= -k_s(v_{sz} - v_{1,3}^U) + k_s \alpha_s l_{sz}^U (T_{n+1} - T_o) \\ F_{2z} &= -k_c(v_{sz} - v_{2,3}^U) + k_c \alpha_c l_{sz}^U (T_{n+1} - T_o) \end{aligned} \right\} \quad (2.2.92)$$

ここで、

$v_{sz}$  : 境界 (I) での軸方向変位

$v_{1,3}^U$  : 境界 (II) でのペレット軸方向変位

$v_{2,3}^U$  : 境界 (II) での被覆管軸方向変位

$\alpha_s$  : プレナムスプリングの熱膨張係数

$\alpha_c$  : プレナム部被覆管の熱膨張係数

$l_{sz}^U$  : 上部プレナム長

$T_{n+1}$  : 現タイムステップ ( $n+1$  ステップ) のプレナム温度

$T_o$  : 初期プレナム温度

である。

調整パラメータ XKSU,XKSL,AKSU,AKSL

上部プレナムバネ定数 XKSU, 下部プレナムバネ定数 XKSL, 上部プレナムバネ熱膨張率 AKSU, 下部プレナムバネ熱膨張率 AKSL は入力で指定する。

XKSU の標準値は  $1500\text{N/m}$ , XKSL の標準値は  $2500\text{N/m}$ , AKSU,AKSL の標準値は  $1.5 \times 10^{-5}(1/K)$  である。

次に、(2.2.92)式を増分形に書き直す。

$$\left. \begin{aligned} \Delta F_{1z} &= -k_s(\Delta v_{sz} - \Delta v_{1,3}^U) + k_s \alpha_s l_{sz}^U (T_{n+1} - T_n) \\ \Delta F_{2z} &= -k_c(\Delta v_{sz} - \Delta v_{2,3}^U) + k_c \alpha_c l_{sz}^U (T_{n+1} - T_n) \end{aligned} \right\} \quad (2.2.93)$$

また、(2.2.93)式を次の形に書きなおす。

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} -\Delta F_{1z} \\ \Delta F_{1z} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -k_s \alpha_s l_{sz}^U (T_{n+1} - T_n) \\ k_s \alpha_s l_{sz}^U (T_{n+1} - T_n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s - k_s \\ -k_s \ k_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v_{sz} \\ \Delta v_{1,3}^U \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} -\Delta F_{2z} \\ \Delta F_{2z} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -k_c \alpha_c l_{sz}^U (T_{n+1} - T_n) \\ k_c \alpha_c l_{sz}^U (T_{n+1} - T_n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_c - k_c \\ -k_c \ k_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v_{sz} \\ \Delta v_{2,3}^U \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (2.2.94)$$

(2.2.94)式をまとめると、

$$\begin{bmatrix} \Delta F_{pz} \\ \Delta F_{1z} \\ \Delta F_{2z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Delta F_{1z} - \Delta F_{2z} \\ \Delta F_{1z} \\ \Delta F_{2z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(k_s \alpha_s + k_c \alpha_c) l_{sz}^U (T_{n+1} - T_n) \\ k_s \alpha_s l_{sz}^U (T_{n+1} - T_n) \\ k_c \alpha_c l_{sz}^U (T_{n+1} - T_n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s + k_c & -k_s & -k_c \\ -k_s & k_s & 0 \\ -k_c & 0 & k_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v_{sz} \\ \Delta v_{1,3}^U \\ \Delta v_{2,3}^U \end{bmatrix} \quad (2.2.95)$$

が得られる。

(2.2.95)式を(2.2.89)式に代入する。ここで  $\Delta F_{1z}$ ,  $\Delta F_{2z}$  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(2.2.89)式は、以下のように書ける。これが解くべき全体マトリックスである。

$$\begin{bmatrix} B_{ee} & | & 0 & \cdots & 0 \\ & | & \vdots & & \vdots \\ & | & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u \\ \vdots \\ \Delta u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta F \\ \vdots \\ \Delta F_{1z} - k_s \alpha_s l_{sz}^U (T_{n+1} - T_n) \\ \Delta F_{2z} - k_c \alpha_c l_{sz}^U (T_{n+1} - T_n) \\ \Delta F_{pz} + (k_s \alpha_s + k_c \alpha_c) l_{sz}^U (T_{n+1} - T_n) \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} B_{et,n+1} \end{bmatrix} \quad (2.2.96)$$

## (2) 下部プレナム

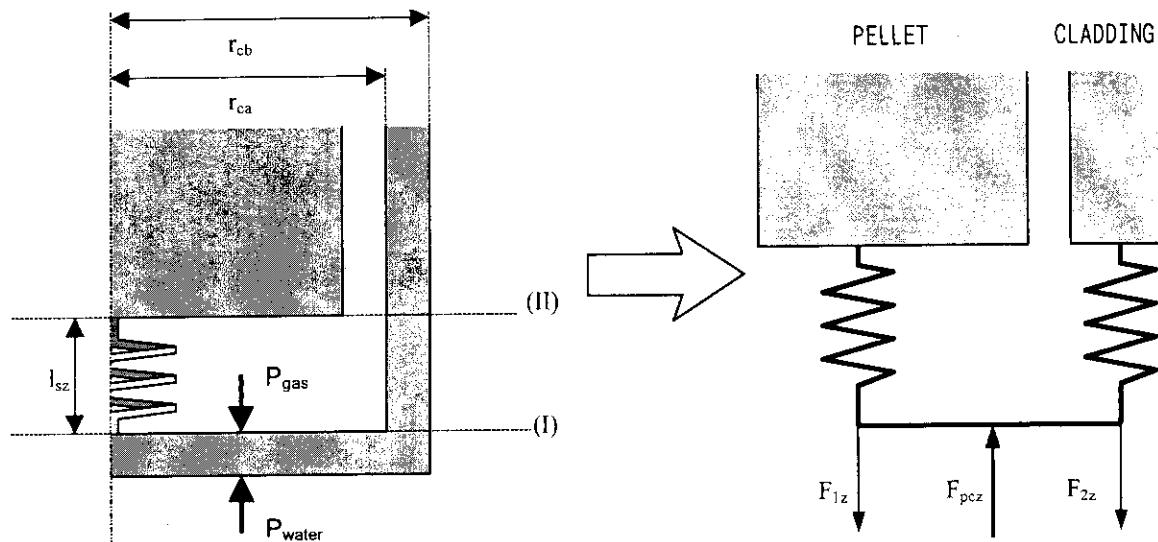


図 2.36 下部プレナム境界条件

下部プレナムが存在しない場合は、(2.2.88)式中、 $\Delta v_{1,1}^L = \Delta v_{2,1}^L = 0$  なので、マトリクス上から対応する自由度を削除し、対応するマトリックスの行と列を削除すれば、境界条件は満たされる。

下部プレナムが存在する場合は、 $\Delta v_{1,1}^L \neq 0$ ,  $\Delta v_{2,1}^L \neq 0$  であるから、

$$\left. \begin{aligned} F_{1z} &= -k_s v_{1,1}^L + k_s \alpha_s l_{sz}^L (T_{n+1} - T_0) \\ F_{2z} &= -k_c v_{2,1}^L + k_c \alpha_c l_{sz}^L (T_{n+1} - T_0) \end{aligned} \right\} \quad (2.2.97)$$

ここで、

$l_{sz}^L$  : 下部プレナム長

である。

(2.2.97)式を増分形で与えると、

$$\left. \begin{aligned} \Delta F_{1z} &= -k_s \Delta v_{1,1}^L + k_s \alpha_s l_{sz}^L (T_{n+1} - T_n) \\ \Delta F_{2z} &= -k_c \Delta v_{2,1}^L + k_c \alpha_c l_{sz}^L (T_{n+1} - T_n) \end{aligned} \right\} \quad (2.2.98)$$

となる。 (2.2.98)式を(2.2.96)式に組み込めば、

$$\begin{bmatrix}
 B_{ee} + k_s & B_{ee} & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\
 B_{ee} & B_{ee} + k_c & 0 & \cdots & 0 & \vdots & & \vdots \\
 \hline
 0 & 0 & & & & \vdots & & \vdots \\
 \vdots & \vdots & B_{ee} & & & \vdots & & \vdots \\
 \vdots & \vdots & & 0 & \cdots & 0 & & \vdots \\
 \hline
 \vdots & \vdots & 0 & \cdots & 0 & B_{ee} + k_s & B_{ee} & -k_s \\
 \vdots & \vdots & & \vdots & & B_{ee} & B_{ee} + k_c & -k_c \\
 \hline
 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -k_s & -k_c & k_s + k_c
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 \Delta v_{1,1}^L \\ \Delta v_{2,1}^L \\ \vdots \\ \Delta u \\ \vdots \\ \Delta v_{1,3}^U \\ \Delta v_{2,3}^U \\ \Delta v_x
 \end{bmatrix}
 = \begin{bmatrix}
 -\Delta F_{1z} + k_s \alpha_s l_s^L (T_{n+1} - T_n) \\ -\Delta F_{2z} + k_c \alpha_c l_c^L (T_{n+1} - T_n) \\ \vdots \\ \Delta F \\ \vdots \\ \Delta F_{1z} - k_s \alpha_s l_s (T_{n+1} - T_n) \\ \Delta F_{2z} - k_c \alpha_c l_c (T_{n+1} - T_n) \\ \Delta F_{px} + (k_s \alpha_s + k_c \alpha_c) l_s (T_{n+1} - T_n)
 \end{bmatrix}$$

(2.2.99)

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

(2.2.99)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定

ペレット・被覆管の接触条件について、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2.1に示す。

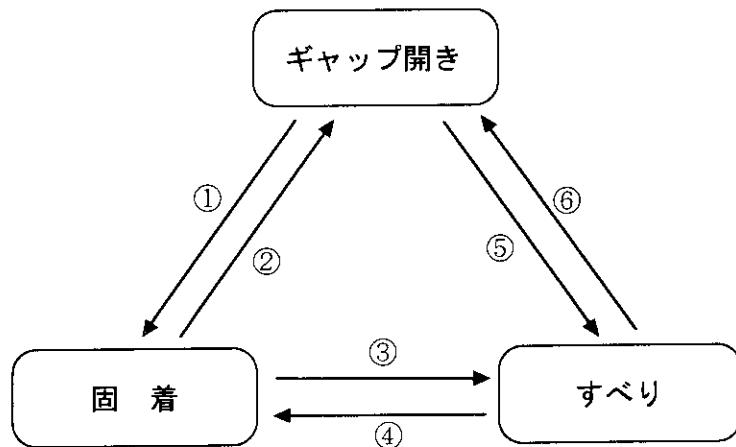


図 2.37 接触状態の変化 (①～⑥は表 2.1 参照)

表 2.1 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  | キヤップ開き → 固着     | ギャップ幅が正から負に変化した時に、<br>タイムステップコントロールを行い $ F_3  < \mu  F_2 $ の条件を満足した場合<br>固着と判定          |
| ②  | 固着 → キヤップ開き     | 接触力 $F_2$ が負から正に変化した場合、キヤップ開きと判定。<br>タイムステップコントロールを行う。                                  |
| ③  | 固着 → すべり        | 接触状態で $ F_3  \geq \mu  F_2 $ に変化した時、すべりと判定。<br>タイムステップコントロールは行わない。                      |
| ④  | すべり → 固着        | 接触状態で $ F_3  < \mu  F_2 $ に変化した時、固着と判定。<br>タイムステップコントロールは行わない。                          |
| ⑤  | すべり<br>→ キヤップ開き | ②の条件と同じ。  |
| ⑥  | キヤップ開き<br>→ すべり | ギャップ幅が正から負に変化したとき、<br>タイムステップコントロールを行い、<br>$ F_3  \geq \mu  F_2 $ の条件を満足した場合<br>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、また  $\mu$  はペレット・被覆管の間の摩擦係数である。

### (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、被覆管の軸方向変位増分が等しく、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、

$$\left. \begin{aligned} \Delta v_p &= \Delta v_c \\ |F_3| &< \mu |F_2| \end{aligned} \right\} \quad (2.2.100)$$

である。ここで、 $\Delta v_p$  はペレットの軸方向変位増分で、 $\Delta v_c$  は被覆管の変位増分である。また、 $\mu$  は前出の断面積補正を行った摩擦係数である。

固着モードが仮定されているとき、(2.2.100)式の  $\Delta v_p = \Delta v_c$  は判定のための境界条件として与えられるから、 $|F_3| < \mu |F_2|$  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

$$|F_3| = \mu |F_2| \quad (2.2.101)$$

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状態変化の判定条件として

$$F_3 < \mu F_2$$

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、軸力の向きと軸方向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、

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

または

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

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。

## (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、

$$\begin{aligned} S_{i,i+1} &= F_{3,U} + (F_{3,5} - F_{3,U}) + (F_{3,4} - F_{3,5}) \\ &\quad + \cdots + (F_{3,i} - F_{3,i+1}) \\ &= F_{3,i} \end{aligned} \quad (2.2.102)$$

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つてすべての軸方向セグメントで同時に実行する。

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。

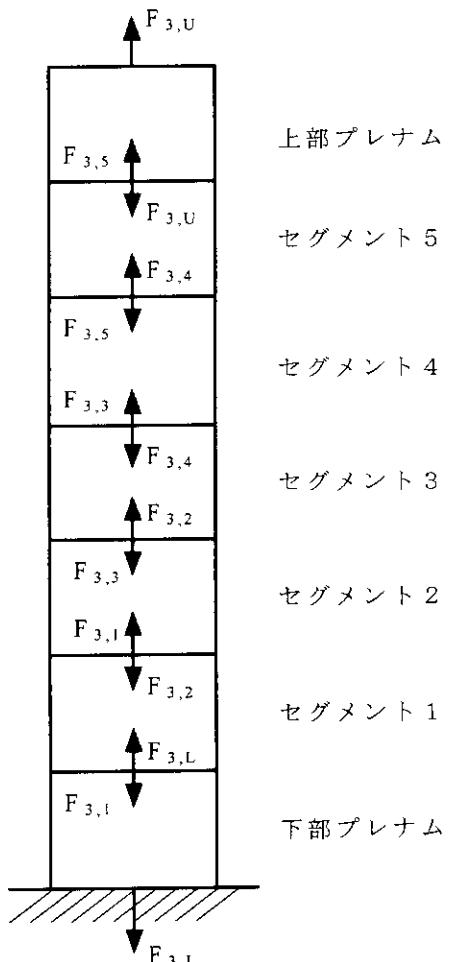


図 2.38 ペレットにかかる軸方向の力

### (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において、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

接觸 → 非接觸への変化： 接触圧がゼロとなる時点

これらの場合は、すべての時間依存データを時間に対して線形補間を行って状態変化の時点の値へ修正する。次に、タイムステップ幅  $\Delta t_i$  を変更して（細分化して）、力学的解析部分の計算のみを新しい接觸条件で行う。

すなわち、熱的解析部分は 2.1.6 節で述べた方法で  $\Delta t_i$  が細分化され、力学的解析部分では本タイムステップコントロールにより  $\Delta t_i$  が細分化される。

モデルパラメータ LCMAX  
固着・すべり判定の最大回数は  
LCMAX で指定する。LCMAX の標準値  
は 3 である。

## 2. 3 物性値

本コードで使用する物性値、物性式を示す。(注：ref. の欄の＊は、ソース不明を示す)

### 2.3.1 ペレット物性値

#### (1) ペレット熱伝導度

ペレット熱伝導度の物性式は以下のオプションより選択する。

| UO <sub>2</sub> 熱伝導度 (1)   | MATPRO-Version 09 | 使用条件 | ref. |
|--|-------------------|------|------|
| 0~1,650°Cに対して<br>$K = \left\{ \frac{1 - \beta(1 - D)}{1 - 0.05\beta} \right\} \cdot \left\{ \frac{40.4}{464 + T} + 1.216 \times 10^{-4} \exp(1.867 \times 10^{-3}T) \right\}$  |                   |      |      |
| 1,650~2,840°Cに対して<br>$K = \left\{ \frac{1 - \beta(1 - D)}{1 - 0.05\beta} \right\} \cdot \left\{ 0.0191 + 1.216 \times 10^{-4} \exp(1.867 \times 10^{-3}T) \right\}$  | 標準値：<br>IPTHCN=1  | 23   |      |
| $K$ : UO <sub>2</sub> ペレットの熱伝導度 (W/cm · K)<br>$\beta$ : 気孔率係数、 $\beta = 2.58 - 0.58 \times 10^{-3}T$<br>$D$ : UO <sub>2</sub> 理論密度比<br>$T$ : 温度 (°C)   |                   |      |      |
| UO <sub>2</sub> 熱伝導度 (2)   | Washington        |      |      |
| $K = F \cdot \left\{ (0.040 + 2.57 \times 10^{-4} \cdot T_K)^{-1} + 72.6 \times 10^{-12} \cdot T_K^3 \right\}$ (W / mK)<br>$F = 1.0 - 2.5 \cdot P$<br>$P$ : porosity=1.0 - (UO <sub>2</sub> density/Theoretical density)<br>$T_K$ : 温度 (K)   | IPTHCN=2          | 37   |      |
| UO <sub>2</sub> 熱伝導度 (3)   | Hirai             |      |      |
| $K = K_{95\%TD} \cdot (1 - \beta p) / (1 - 0.05 \cdot \beta)$ (W / mK)<br>$K_{95\%TD} = (2.35 \times 10^{-2} + 2.55 \times 10^{-4} \cdot T_K)^{-1} + 3.57 \times 10^{-12} \cdot T_K^3$<br>$\beta = 2.58 - 0.58 \times 10^{-3}T \rightarrow$ Ref.(8)<br>$P$ : porosity<br>$T_K$ : 温度 (K)  | IPTHCN=3          | 38   |      |
| UO <sub>2</sub> 熱伝導度 (4)   | Halden            |      |      |
| $K = F / \left\{ 0.1148 + 0.0035 \cdot B + (2.475 \times 10^{-4} - 8 \times 10^{-7} \cdot B)T \right\}$<br>$+ F \cdot 0.0132 \exp(0.00188 \cdot T)$ (W / mK)<br>$F = (1 - \beta p) / (1 - 0.05 \cdot \beta)$<br>$\beta = 2.58 - 0.58 \times 10^{-3}T \rightarrow$ Ref.(8)<br>$P$ : porosity<br>$B$ : 燃焼度 (MWd/kgUO <sub>2</sub> )<br>$T$ : 温度 (°C) | IPTHCN=4          | 39   |      |

|   |          |      |  |
|---|----------|------|--|
| UO <sub>2</sub> 熱伝導度 (5) Modified Hirai   |          |      |  |
| $K = K_{95\%TD} \cdot (1 - \beta p) / (1 - 0.05 \cdot \beta)$ (W / mK)<br>$K_{95\%TD} = (2.35 \times 10^{-2} + 4.7 \times 10^{-3} \cdot B) + (2.55 \times 10^{-4} \cdot T_K - 1.5 \times 10^{-6} \cdot B)$<br>$+ 3.57 \times 10^{-12} \cdot T_K^3$<br>$\beta = 2.58 - 0.58 \times 10^{-3} T$ → Ref.(8)<br><br><i>P</i> : porosity<br>$T_K$ : 温度 (K)<br>$B$ : 燃焼度 (MWd/kg-U)<br>(本式は、Hirai <sup>(38)</sup> の式に Halden <sup>(39)</sup> モデルと同様な燃焼度依存性を付加した、EXBURN-I 内の暫定モデルである。)                     | IPTHCN=5 | -    |  |
| UO <sub>2</sub> 熱伝導度 (6) Forsberg   |          |      |  |
| $K = F \left\{ 0.047 + 1.73 \times 10^{-3} \cdot B + (2.5 \times 10^{-4} - 5.41 \times 10^{-8} \cdot B) T_K \right\}^{-1}$ (W / mK)<br><br>$F = 1.0 - \beta \cdot p$<br>$\beta = 2.58 - 0.58 \times 10^{-3} T$ → Ref.(8)<br><br><i>P</i> : porosity<br>$T_K$ : 温度 (K)<br>$B$ : 燃焼度 (MWd/kg-U)   | IPTHCN=6 | 40   |  |
| UO <sub>2</sub> 熱伝導度 (7) Kjaer-Pedersen   |          |      |  |
| $K = 93 / (0.0224 \cdot T_K + 1.1 + 56 \cdot P + 3 \cdot G(B)) + 2.5 \cdot 10^{-14} \cdot T_K^4$<br>$B \leq 10 \quad G = (B/10)^2$<br>$B \geq 10 \quad G = ((B-7.5)/10)^{0.5}$<br><br><i>P</i> : porosity<br>$T_K$ : 温度 (K)<br>$B$ : 燃焼度 (MWd/kg-U)   | IPTHCN=7 | 41   |  |
| MOX熱伝導度 Martin  | 使用条件     | Ref. |  |
| 1) 12% ≤ PuO <sub>2</sub> ≤ 30% の場合   |          |      |  |
| $K_{MOX} = (0.037 + 3.33y + 2.37 \times 10^{-4} T_K)^{-1} + 78.9 \times 10^{-12} T_K^3$<br><br>2) 0% ≤ PuO <sub>2</sub> ≤ 12% の場合<br>$K(f) = K_u \cdot (1 - f / 0.12) + K_{MOX} \cdot f / 0.12$<br><br>ここで<br>$K$ : 热伝導度 (W/m · K), $T_K$ : 温度 (K)<br>$y$ : MO <sub>2-y</sub> , $f$ : Pu の mole 分率<br>$K_u$ : UO <sub>2</sub> 热伝導度 (W/m · K)<br>$K_u = [(0.035 + 2.25 \cdot 10^{-4} \cdot T_K)^{-1} + 83.0 \cdot 10^{-12} \cdot T_K^3] \cdot (1+z)$<br>$(z : UO_{2-z}, \quad 0 \leq z \leq 0.05)$ | MOX=1    | 42   |  |

MOX=1 の場合には次の値を入力で指定する。

| 変数名 | 内容                                      | 標準値 |
|-----|---|-----|
| PU  | PuO <sub>2</sub> 重量比 (→コード内部でモル分率に変換する) | 0.0 |
| Y   | MO <sub>2-y</sub> の y の値 (zについても共通に用いる) | 0.0 |

| ガドリニア入りペレット熱伝導度 Fukushima  | 使用条件                               | ref.                      |   |     |                          |                           |      |                           |                           |       |                           |                           |       |                           |                           |       |    |
|--|------------------------------------|---------------------------|---|-----|--------------------------|---------------------------|------|---------------------------|---------------------------|-------|---------------------------|---------------------------|-------|---------------------------|---------------------------|-------|----|
| $K = \frac{1}{aT + b}$ <p>ここで</p> <p>K : 热伝導度 (W/m · K)</p> <p>T : 温度 (°C)</p> <p>a, b : Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 濃度の関数 (下表)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (-)</th> <th>a</th> <th>b</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.0</td> <td><math>2.32733 \times 10^{-4}</math></td> <td><math>1.180229 \times 10^{-1}</math></td> </tr> <tr> <td>0.03</td> <td><math>2.131412 \times 10^{-4}</math></td> <td><math>1.732423 \times 10^{-1}</math></td> </tr> <tr> <td>0.057</td> <td><math>1.996481 \times 10^{-4}</math></td> <td><math>2.069985 \times 10^{-1}</math></td> </tr> <tr> <td>0.085</td> <td><math>1.961735 \times 10^{-4}</math></td> <td><math>2.342200 \times 10^{-1}</math></td> </tr> </tbody> </table> <p>Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の濃度に対する a, b の値の補間式は <math>K = rA^{Gd}</math> 式に、上記のテーブルより前後する Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 濃度に対して、K が一致するように r と A を求めて、この r, A の値を用いて K を決定する。</p> | Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (-) | a                         | b | 0.0 | $2.32733 \times 10^{-4}$ | $1.180229 \times 10^{-1}$ | 0.03 | $2.131412 \times 10^{-4}$ | $1.732423 \times 10^{-1}$ | 0.057 | $1.996481 \times 10^{-4}$ | $2.069985 \times 10^{-1}$ | 0.085 | $1.961735 \times 10^{-4}$ | $2.342200 \times 10^{-1}$ | IGD=1 | 43 |
| Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (-)   | a                                  | b                         |   |     |                          |                           |      |                           |                           |       |                           |                           |       |                           |                           |       |    |
| 0.0  | $2.32733 \times 10^{-4}$           | $1.180229 \times 10^{-1}$ |   |     |                          |                           |      |                           |                           |       |                           |                           |       |                           |                           |       |    |
| 0.03   | $2.131412 \times 10^{-4}$          | $1.732423 \times 10^{-1}$ |   |     |                          |                           |      |                           |                           |       |                           |                           |       |                           |                           |       |    |
| 0.057  | $1.996481 \times 10^{-4}$          | $2.069985 \times 10^{-1}$ |   |     |                          |                           |      |                           |                           |       |                           |                           |       |                           |                           |       |    |
| 0.085  | $1.961735 \times 10^{-4}$          | $2.342200 \times 10^{-1}$ |   |     |                          |                           |      |                           |                           |       |                           |                           |       |                           |                           |       |    |

IGD=1 の場合には次の値を入力する。

| 変数名 | 内容  | 標準値 |
|-----|---|-----|
| GD  | Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 濃度 (Wt.frac) | 0.0 |

## (2) ペレット熱膨張

ペレット熱膨張の物性式は以下のオプションより選択する。

(注: ref. の欄の\*は、ソース不明を示す)

| UO <sub>2</sub> 熱膨張 (1)  | MATPRO-Version 09  | 使用条件                          | ref. |
|--|--------------------|-------------------------------|------|
| $\frac{\Delta L}{L} = -4.972 \times 10^{-4} + 7.107 \times 10^{-6} T + 2.581 \times 10^{-9} T^2 + 1.140 \times 10^{-13} T^3$ |                    | IPTHEX=0<br>(標準値)<br>IPTHEX=1 | 23   |
| $\frac{\Delta L}{L}$ : 線熱膨張  |                    |                               |      |
| $T$ : 温度 (°C)  |                    |                               |      |
| UO <sub>2</sub> 熱膨張 (2)  | Burdick and Parker | IPTHEX=2                      | *    |
| $\frac{\Delta L}{L} = -3.0289 \times 10^{-4} + 8.4217 \times 10^{-6} T + 2.1481 \times 10^{-9} T^2$                          |                    |                               |      |
| $T$ : 温度 (°C)  |                    |                               |      |
| 温度範囲 : 27~1260°C   |                    |                               |      |
| $\Delta L / L$ : 27°Cでの長さを基準とした線熱膨張  |                    |                               |      |
| UO <sub>2</sub> 熱膨張 (3)  | Halden             | IPTHEX=3                      | *    |
| $\frac{\Delta L}{L} = 6.0 \times 10^{-6} T + 2.0 \times 10^{-9} T^2 + 1.7 \times 10^{-12} T^3$                               |                    |                               |      |
| $T$ : 温度 (°C)  |                    |                               |      |
| 温度範囲 : 900~2,800°C (融点)  |                    |                               |      |
| UO <sub>2</sub> 熱膨張 (4)  | Conway and Fincel  | IPTHEX=4                      | *    |
| $\frac{\Delta L}{L} = -1.723 \times 10^{-4} + 6.797 \times 10^{-6} T + 2.896 \times 10^{-9} T^2$                             |                    |                               |      |
| $T$ : 温度 (°C)  |                    |                               |      |
| 温度範囲 : 1,000~2,250°C   |                    |                               |      |

(3) UO<sub>2</sub>密度

UO<sub>2</sub>の理論密度の物性値を示す。

| UO <sub>2</sub> 密度                                 | MATPRO-Version 09 | 使用条件 | ref. |
|--|-------------------|------|------|
| $\rho = 10.96$                                     |                   | 常時   | 23   |
| $\rho$ : UO <sub>2</sub> 理論密度 (g/cm <sup>3</sup> ) |                   |      |      |

(4) UO<sub>2</sub>ヤング率

UO<sub>2</sub>のヤング率の物性式を示す。

| UO <sub>2</sub> ヤング率   | MATPRO-Version 09 | 使用条件 | ref. |
|--|-------------------|------|------|
| $E = 2.26 \times 10^{11} (1 - 1.131 \times 10^{-4} T) [1 - 2.62(1 - D)]$ |                   |      |      |
| $E$ : ヤング率 (Pa)  |                   |      |      |
| $T$ : 温度 (°C)  |                   |      |      |
| $D$ : 理論密度比  |                   |      |      |
|  |                   | 常時   | 23   |

(5) UO<sub>2</sub> ポアソン比

UO<sub>2</sub> のポアソン比の物性値を示す。

| UO <sub>2</sub> ポアソン比         | MATPRO-Version 09 | 使用条件 | ref. |
|-------------------------------|-------------------|------|------|
| $\nu = 0.316$                 |                   | 常時   | 23   |
| $\nu$ : UO <sub>2</sub> ポアソン比 |                   |      |      |

(6) UO<sub>2</sub> クリープ

UO<sub>2</sub> クリープ速度の物性式を示す。

| UO <sub>2</sub> クリープ   | MATPRO-Version 09 | 使用条件 | ref. |
|--|-------------------|------|------|
| $\varepsilon = \frac{(A_1 + A_2 F)\sigma \exp(-Q_1 / RT)}{(A_3 + D)G^2} + \frac{A_4 \sigma^{4.5} \exp(-Q_2 / RT)}{(A_5 + D)} + A_6 \sigma F \exp(-Q_3 / RT)$ $\varepsilon$ : 定常クリープ速度 (1/h)<br>$A_1 = 9.728 \times 10^6$<br>$A_2 = 3.24 \times 10^{-12}$<br>$A_3 = -87.7$<br>$A_4 = 1.376 \times 10^{-4}$<br>$A_5 = -90.5$<br>$A_6 = 9.24 \times 10^{-28}$<br>$Q_1 = 90,000 (\text{cal/mol})$<br>$Q_2 = 132,000 (\text{cal/mol})$<br>$Q_3 = 5,200 (\text{cal/mol})$<br>$F$ : 核分裂率 $8.4 \times 10^{17} \sim 1.18 \times 10^{20} (\text{fiss./m}^3 \cdot \text{sec})$<br>$\sigma$ : 応力 1,000~16,000 (psi)<br>$T$ : 温度 713~2,073 (K)<br>$D$ : 密度 92~98 (%TD)<br>$G$ : 粒径 4~35 ( $\mu\text{m}$ )<br>$R$ : ガス定数 1.987 (cal/mol · K) | 常時                | 23   |      |

なお、UO<sub>2</sub> クリープ速度式を用いる場合には、以下の調整パラメータがある。

| 変数名    | 内容                              | 標準値     |
|--------|---------------------------------|---------|
| FCRFAC | クリープ速度式に対する倍率 (変形モデル)           | 10.0    |
| TCS    | クリープ計算での参照温度のカットオフ値 (変形モデル) (K) | 2073.15 |
| TCRMAX | クリープ計算での参照温度のカットオフ値 (熱モデル) (K)  | 1773.15 |

(7) UO<sub>2</sub>スウェリング

UO<sub>2</sub>スウェリングの物性式のオプションを示す。UO<sub>2</sub>のスウェリングは、固体FPによるスウェリングとガスバブルスウェリングとがある。

物性式オプションは、固体FPスウェリングとガスバブルスウェリングをそれぞれ独立に扱う場合と、全体を1つの物性式を与える場合とに大別している。

| UO <sub>2</sub> スウェリング (1)   | Chubb      | 使用条件              | ref. |
|--|------------|-------------------|------|
| (ガスバブルスウェリング)  |            |                   |      |
| $\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^{gs} = 4.396 \times 10^2 \exp\left(-\frac{1.645 \times 10^4}{T_s}\right)$ |            | IFSWEL=0<br>(標準値) | 44   |
| $T_s = T - 100$  |            |                   |      |
| $\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^{gs}$ : 10 <sup>20</sup> fissions/cm <sup>3</sup> 当りの体積ガスバブルスウェリング        |            |                   |      |
| $T$ : 温度 (K)   |            |                   |      |
| UO <sub>2</sub> スウェリング (1')  | FEMAXI-III |                   |      |
| (固体FPスウェリング)   |            |                   | 1    |
| $\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^{ss} = 0.0025$  |            |                   |      |
| $\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^{ss}$ : 10 <sup>20</sup> fissions/cm <sup>3</sup> 当りの体積固体FPスウェリング         |            |                   |      |

なお、ISWEL=0の場合には、以下の調整パラメータがある。

| 変数名   | 内容   | 標準値                  |
|-------|--|----------------------|
| STFCP | ガスバブルスウェリングの発生を抑える<br>平均接触圧力 (Pa) (変形モデルで使用) | -3 × 10 <sup>7</sup> |
| SPCON | ガスバブルスウェリングの発生を抑える<br>平均接触圧力 (Pa) (熱モデルで使用)  | -10 <sup>6</sup>     |

| UO <sub>2</sub> スウェリング (2)   | Speight    | 使用条件 | ref. |
|--|------------|------|------|
| (ガスバブルスウェリング)<br><u>粒内ガスバブルスウェリング</u><br>$\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^{gs1} = \frac{4}{3}\pi a^3 N$ <p style="text-align: center;"><math>a</math> : 粒内バブル半径 (cm)<br/> <math>N</math> : 単位体積当りのバブル数 (1/cm<sup>3</sup>)</p>  |            |      |      |
| <u>粒界ガスバブルスウェリング</u><br>$\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^{gs2} = Bg \frac{3\pi}{2R} h \bar{a}^3 \left\{ 1 + \frac{h^2}{3} \right\}$ <p style="text-align: center;"><math>Bg</math> : 単位面積当りのバブル数 (1/cm<sup>3</sup>)<br/> <math>R</math> : 結晶粒半径 (cm)<br/> <math>\bar{a}</math> : 粒内バブル半径 (cm)<br/> <math>h</math> : 定数 (=1)<br/> <math display="block">\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^{gs} = \left(\frac{\Delta V}{V}\right)^{gs1} + \left(\frac{\Delta V}{V}\right)^{gs2}</math> <math display="block">\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^{gs}</math> : 体積ガスバブルスウェリング<br/> <math display="block">\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^{gs1}</math> : 体積粒内ガスバブルスウェリング<br/> <math display="block">\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^{gs2}</math> : 体積粒界ガスバブルスウェリング</p> | IFSWEL=1   | 27   |      |
| UO <sub>2</sub> スウェリング (1')  | FEMAXI-III |      | 1    |
| (固体 FP スウェリング)   |            |      |      |
| $\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^{ss} = 0.0025$  |            |      |      |
| $\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^{gs1}$ : 10 <sup>20</sup> fissions/cm <sup>3</sup> 当りの体積固体 FP スウェリング  |            |      |      |

なお、IFSWEL=1 の場合には、以下の調整パラメータがある。

| 変数名  | 内容  | 標準値 |
|------|---|-----|
| FACP | <p>粒界バブル半径 <math>\bar{a}</math> は以下の式により求める。</p> $P_m = \frac{m}{v} RT = \frac{2r}{\bar{a}} + P_{out}$ <p>ここで、 <math>P_m</math> : 粒界バブル内圧力<br/> <math>m</math> : 1バブル中のガスモル数<br/> <math>v</math> : バブル体積 <math>\left( = \pi h \bar{a}^3 \left( 1 + \frac{h^2}{3} \right) \right)</math></p> <p><math>R</math> : 気体定数<br/> <math>T</math> : 温度<br/> <math>r</math> : 表面張力<br/> <math>\bar{a}</math> : 粒界バブル半径<br/> <math>P_{out}</math> : 粒界バブル外圧力</p> <p>である。ここで <math>P_{out}</math> は、</p> $P_{out} = P_{gas} + P_{fc} \cdot FACP$ <p>で与える。</p> <p>ここで、 <math>P_{gas}</math> : プレナム圧力<br/> <math>P_{fc}</math> : ペレット被覆管平均接触圧力</p> <p>である。したがって、FACP は粒界バブル外圧力を調整するパラメータである。</p> <p>(変形・熱モデル共通)</p> | 1.0 |

| UO <sub>2</sub> スウェリング (3) | MATPRO-Version 09                                  | 使用条件     | ref. |
|----------------------------|--|----------|------|
| 中心温度範囲 T (°C)              | スウェリング率 (%/10 <sup>20</sup> fiss/cm <sup>3</sup> ) |          |      |
| $T \leq 1,400$             | 0.28   |          |      |
| $1,400 \leq T \leq 1,800$  | $0.28[1 + 0.00575(T - 1,400)]$                     | IFSWEL=2 | 23   |
| $1,800 \leq T \leq 2,200$  | $0.28[3.3 - 0.004(T - 1,800)]$                     |          |      |
| $2,200 < T$                | 0.476  |          |      |

| UO <sub>2</sub> スウェリング (4)   | Halden | 使用条件     | ref. |
|--|--------|----------|------|
| 体積スエリング率 : $\left( \frac{\Delta V}{V} \right) = 0.5\% / 10\text{MWd/kgUO}_2$ |        | IFSWEL=3 | 39   |

(8)  $\text{UO}_2$  のホットプレス

降伏関数の流れ則は次式で与える。ここでは、2.3 節で用いた  $r-z$  平面での剪断成分項を含めた場合の式を示す。ただし、 $\alpha$  はホットプレスパラメータである<sup>(36)</sup>。

$$\bar{\sigma} = \left[ \frac{3}{2(F+G+H)} \left\{ H(\sigma_r - \sigma_z)^2 + F(\sigma_z - \sigma_\theta)^2 + G(\sigma_\theta - \sigma_r)^2 + 2N\tau_{rz}^2 \right\} + 3\alpha(\sigma_r + \sigma_z + \sigma_\theta)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.3.1)$$

$$\{\Delta\varepsilon_{n+1}^P\} = \Delta\bar{\varepsilon}_{n+1}^{zP} \left\{ \frac{\partial\bar{\sigma}}{\partial\sigma} \right\}_{n+\theta} \quad (2.3.2)$$

ペレット材質の等方性 ( $H = F = G = 1, N = 3$ ) を仮定すると、(2.3.1)式より

$$\frac{\partial\bar{\sigma}}{\partial\sigma_r} = \frac{3}{2\bar{\sigma}} \left\{ \frac{2\sigma_r - \sigma_z - \sigma_\theta}{3} + 2\alpha(\sigma_r + \sigma_z + \sigma_\theta) \right\} \quad (2.3.3)$$

が成り立つ。したがって、

$$\left\{ \frac{\partial\bar{\sigma}}{\partial\sigma} \right\}_{n+\theta} = \frac{1}{\bar{\sigma}_{n+\theta}} \begin{bmatrix} 1+3\alpha & -0.5+3\alpha & -0.5+3\alpha & 0 \\ & 1-3\alpha & -0.5+3\alpha & 0 \\ & & \text{Sym.} & 1+3\alpha & 0 \\ & & & & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \{\sigma_{n+\theta}\} \quad (2.3.4)$$

である。これを(2.3.2)式に代入し、整理すると、

$$\{\Delta\varepsilon_{n+\theta}^P\} = \frac{(1+3\alpha)\Delta\bar{\varepsilon}_{n+1}^P}{\bar{\sigma}_{n+\theta}} \begin{bmatrix} 1 & -v^P & -v^P & 0 \\ & 1 & -v^P & 0 \\ & & 1 & 0 \\ & & & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \{\sigma_{n+\theta}\} \quad (2.3.5)$$

となる。ここで、 $v^P = \frac{0.5-3\alpha}{1+3\alpha}$  である。

塑性による体積ひずみ増分  $\Delta\varepsilon_{h,n+1}^P$  は、

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_{h,n+1}^P &= \Delta\varepsilon_{n+1}^{P,r} + \Delta\varepsilon_{n+1}^{P,z} + \Delta\varepsilon_{n+1}^{P,\theta} \\ &= \frac{(1+3\alpha)\Delta\bar{\varepsilon}_{n+1}^P}{\bar{\sigma}} (1-2v^P)(\sigma_r + \sigma_z + \sigma_\theta) \\ &= \frac{9\alpha\Delta\bar{\varepsilon}_{n+1}^P}{\bar{\sigma}} (\sigma_r + \sigma_z + \sigma_\theta) \end{aligned} \quad (2.3.6)$$

である。

またクリープの場合も(2.3.6)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  $\Delta\varepsilon_{h,n+1}^c$  は、

$$\Delta\varepsilon_{h,n+1}^c = \frac{9\alpha\Delta\bar{\varepsilon}_{n+1}^c}{\bar{\sigma}}(\sigma_r + \sigma_z + \sigma_\theta) \quad (2.3.7)$$

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変化 (=ホットプレス)  $\Delta\varepsilon_{h,n+1}$  は次のように表される。

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_{h,n+1} &= \Delta\varepsilon_{h,n+1}^P + \Delta\varepsilon_{h,n+1}^c \\ &= \frac{9\alpha}{\bar{\sigma}}(\Delta\bar{\varepsilon}_{n+1}^P + \Delta\bar{\varepsilon}_{n+1}^c)(\sigma_r + \sigma_z + \sigma_\theta) \end{aligned} \quad (2.3.8)$$

ここで、第  $n+1$  ステップにおけるポロシティ  $p_{n+1}$  は、  $p_1$  を初期ポロシティとして

$$p_{n+1} = p_1 + \sum_{i=1}^{n+1} \Delta\varepsilon_{h,i} + \sum_{i=1}^{n+1} \Delta\varepsilon_{swel} + \sum_{i=1}^{n+1} \Delta\varepsilon_{dens} \quad (2.3.9)$$

ただし、

$\Delta\varepsilon_{swel}$  : スエリングひずみ

$\Delta\varepsilon_{dens}$  : 焼きしまりひずみ

である。

なお、  $UO_2$  ホットプレスは、パラメータ  $\alpha$  を調整パラメータとする。

| 変数名   | 内 容   | 標準値            |
|-------|---|----------------|
| BETAX | <p>IHOT=0 の場合、BETAX は初期値に固定である。</p> <p>IHOT=1 の場合、ペレットホットプレスパラメータ <math>\alpha</math> をポロシティの関数として以下のように定義する。</p> $\alpha = BETAX \frac{p_{n+1}}{1 - D_0}$ <p>ここで <math>p_{n+1}</math> : ペレット内部でのポロシティ<br/> <math>D_0</math> : 初期理論密度比</p> <p>この場合、ホットプレスや焼きしまりが進んでポロシティが減少すれば <math>\alpha</math> は 0 に漸近して行くが、負値にはならない。</p> | 0.002<br>(初期値) |

(9) UO<sub>2</sub>焼きしまり

UO<sub>2</sub>焼きしまりの物性式は以下のオプションより選択する。

| UO <sub>2</sub> 焼きしまり (1)  | FEMAX-III | 使用条件              | ref. |
|--|-----------|-------------------|------|
| $\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta V^{\max}}{V} \left(1 - e^{-C \cdot Bu}\right)$ <p style="text-align: center;"><math>\frac{\Delta V}{V}</math> : 焼きしまりによる体積収縮</p> <p style="text-align: center;"><math>\frac{\Delta V^{\max}}{V}</math> : 焼きしまりによる最大体積収縮</p> <p style="text-align: center;"><math>Bu</math> : 燃焼度 (MWd/t-UO<sub>2</sub>)</p> |           | IDENSF=0<br>(標準値) | 1    |

なお、IDENSF=0 の場合には、以下の調整パラメータを用いる。

| 変数名  | 内容  | 標準値    |
|------|---|--------|
| DMAX | 焼きしまりによる最大体積収縮 $\frac{\Delta V^{\max}}{V}$ (%)  | 1.0    |
| SBU  | 焼きしまりの 90% 完了燃焼度 (MWd/t-UO <sub>2</sub> )<br>$(C = \frac{2.3025}{SBU}$ で与えられる)<br>ただし、 $\exp(-2.3025) = 0.1$ である。 | 2500.0 |

| UO <sub>2</sub> 焼きしまり (2)  | Rolstad | 使用条件     | ref. |
|--|---------|----------|------|
| <p>焼きしまりによる最大軸方向寸法変化 (%) の上限は</p> $\frac{\Delta L}{L} = 22.2 \times \frac{(100 - TD)}{(TS - 1180)}$ <p style="text-align: center;">TD : UO<sub>2</sub> の理論密度比 (%TD)</p> <p style="text-align: center;">TS : 焼結温度 (°C) (=TDNSF)</p> <p>ただし、<math>\frac{\Delta L}{L} = 3\%</math> とした場合の燃焼度依存性は、</p> $\frac{\Delta L}{L} = -3.0 + 0.93e^{-BU} + 2.07e^{-35BU}$ <p style="text-align: center;">BU : 燃焼度 (GWd/t-U)</p> |         | IDENSF=1 | 46   |

なお、IDENSF=1 に対しては、以下の調整パラメータを用いる。

| 変数名   | 内容       | 標準値    |
|-------|----------|--------|
| TDNSF | 焼結温度 (K) | 2000.0 |

| UO <sub>2</sub> 焼きしまり (3)   | NRC | 使用条件     | ref. |
|---|-----|----------|------|
| <p>焼きしまりによる密度増加 <math>\Delta\rho</math> (g/cm<sup>3</sup>) は</p> $\begin{cases} \Delta\rho = 0 & (BU \leq BU_1) \\ \Delta\rho = m \log(BU) + b & (BU_1 < BU < BU_2) \\ \Delta\rho = \Delta\rho_{sn} & (BU \geq BU_2) \end{cases}$ <p><math>\Delta\rho_{sn}</math> : 炉外熱処理 (1,700°C × 24h) での密度増加 (g/cm<sup>3</sup>) (=DMAX)<br/> <math>BU</math> : 燃焼度 (MWd/t), <math>BU_1=20\text{MWd/t}</math>, <math>BU_2=2000\text{MWd/t}</math><br/> <math>m, b</math> : 各燃焼度範囲で 3 つの式を連続にする定数</p> |     | IDENSF=2 | 47   |

なお、ISENSF=2 の場合には、以下の調整パラメータを用いる。

| 変数名  | 内容                                  | 標準値 |
|------|-------------------------------------|-----|
| DMAX | 炉外熱処理 (1,700°C × 24 h) での相対密度増加 (%) | 1.0 |

| UO <sub>2</sub> 焼きしまり (4)   | Marlowe  | 使用条件 | ref. |
|---|----------|------|------|
| $\Delta\rho = \frac{M}{A} \ln\left(1 + \frac{AD_{irr}^0 \dot{F}t_{irr}}{G_0^3}\right)$ <p><math>\Delta\rho</math> : 炉内焼きしまり量 (%TD) (=DMAX)<br/> <math>M</math> : 焼きしまり速度定数 (%TD-cm)<br/> <math>A</math> : 粒成長速度定数 (cm)<br/> <math>D_{irr}^0</math> : 照射拡散定数 = <math>1.27 \times 10^{-29}</math> (m<sup>3</sup>/fiss.)<br/> <math>\dot{F}</math> : 核分裂率 (fiss./cm<sup>3</sup>.s)<br/> <math>t_{irr}</math> : 照射時間 (s)<br/> <math>\dot{F}t_{irr}</math> : 燃焼度 (fiss./cm<sup>3</sup>)<br/> <math>G_0</math> : 初期結晶粒径 (cm) (=GGO)</p> <p>定数 M,A は照射する燃料と同バッチ作成のものを炉外熱処理試験することにより次式で求める。</p> $A = \frac{G^3 - G_0^3}{Dt}$ $M = \frac{A\Delta\rho_{th}}{\ln\left(1 + \frac{ADt}{G_0^3}\right)}$ $D = D_0 \cdot \exp(-Q / RT)$ <p><math>G</math> : 热処理後の結晶粒径 (cm) (=GG)<br/> <math>t</math> : 热処理時間 (s) (=SITIM)<br/> <math>\Delta\rho_{th}</math> : 热処理による密度変化 (%TD)<br/> <math>D_0</math> : 热拡散定数 <math>2.32 \times 10^{-5}</math> (cm<sup>2</sup>/s)<br/> <math>Q</math> : 82,000 cal/mol<br/> <math>R</math> : ガス定数 1.987 (cal/mol/K)<br/> <math>T</math> : 処理温度 (K)</p> | IDENSF=3 | 48   |      |

なお、IDENSF=3 の場合には、以下の調整パラメータを用いる。

| 変数名   | 内容             | 標準値                |
|-------|----------------|--------------------|
| DMAX  | 炉心焼きしまり量 (%TD) | 1.0                |
| GG    | 熱処理後の結晶粒径 (m)  | $10^{-5}$          |
| GGO   | 初期結晶粒径 (m)     | $8 \times 10^{-6}$ |
| SITIM | 熱処理時間 (hr)     | 24.0               |

| UO <sub>2</sub> 焼きしまり (5)  | Halden | 使用条件     | ref. |
|--|--------|----------|------|
| 焼きしまりによる体積収縮は<br>$\frac{\Delta V}{V} = - \left[ 0.01420(1 - \exp(-6.7943 \cdot BU)) + 0.00793(1 - \exp(-1.1434 \cdot BU)) \right] \cdot ADST$ BU:燃焼度(MWd/kgUO <sub>2</sub> )<br>ADST:調整ファクター(=0.6) |        | IDENSF=4 | 39   |

## (10) ペレットリロケーション

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、

$$REL = \gamma \cdot (r_{ci}^c - r_{pi}^c) \quad (2.3.10)$$

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。 $\gamma$  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。なお、リロケーションによる調整パラメータは以下のとおりである。

| 変数名    | 内容                             | 標準値   |
|--------|--------------------------------|-------|
| XRELOC | リロケーションパラメータ $\gamma$ (熱モデル用)  | 0.2   |
| FRELOC | リロケーションパラメータ $\gamma$ (変形モデル用) | 0.5   |
| EPSRLZ | 軸方向リロケーションひずみ (変形モデル用)         | 0.003 |

(11) UO<sub>2</sub>塑性

UO<sub>2</sub>の降伏応力およびひずみ硬化パラメータ（接線剛性）の物性式は以下のオプションより選択する。

| UO <sub>2</sub> 塑性 (1)   | Tachibana | 使用条件  | ref. |
|--|-----------|-------|------|
| $\sigma_y = \begin{cases} 66.9 - 0.0397 \cdot T + (520.0 - 0.386 \cdot T) \cdot \bar{\varepsilon}_p & (T \leq 1200^\circ C) \\ 36.6 - 0.0144 \cdot T + (139.5 - 0.06875 \cdot T) \cdot \bar{\varepsilon}_p & (T > 1200^\circ C) \end{cases}$ |           |       |      |
| $H' = \begin{cases} 520.0 - 0.386 \cdot T & (T \leq 1200^\circ C) \\ 139.5 - 0.06875 \cdot T & (T > 1200^\circ C) \end{cases}$   |           | IFY=1 | 52   |
| $\sigma_y$ : 降伏応力 (kg/mm <sup>2</sup> )  |           | (標準値) |      |
| $H'$ : 接線剛性 (kg/mm <sup>2</sup> )  |           |       |      |
| $T$ : 溫度 (°C)  |           |       |      |
| UO <sub>2</sub> 塑性 (2)   | Rodford   |       |      |
| $\sigma_y = 1176.1 - 1.688 \cdot T + 8.179 \times 10^{-4} \cdot T^2$   |           |       |      |
| $- 1.293 \times 10^{-7} \cdot T^3$   |           | IFY=0 | *    |
| $H' = 0.0$   |           |       |      |
| $\sigma_y$ : 降伏応力 (MPa)  |           |       |      |
| $H'$ : 接線剛性  |           |       |      |
| $T$ : 溫度 (°C)  |           |       |      |

(12) UO<sub>2</sub>比熱

UO<sub>2</sub>の比熱の物性式を示す。

| UO <sub>2</sub> 比熱   | MATPRO-Version 09 | 使用条件 | ref. |
|--|-------------------|------|------|
| $C_p = 15.496 \left[ \frac{K_1 \theta^2 \exp(\theta / T)}{T_2 [\exp(\theta / T) - 1]^2} + 2K_2 T + \frac{K_3 E_D}{RT^2} \exp(-E_D / RT) \right]$ |                   |      |      |
| $C_p$ : UO <sub>2</sub> 比熱 (J/kg · K)  |                   | 常時   | 23   |
| $K_1 = 19.145$ (cal/mol · K)   |                   |      |      |
| $K_2 = 7.8473 \times 10^{-4}$ (cal/mol · K <sup>2</sup> )  |                   |      |      |
| $K_3 = 5.6437 \times 10^6$ (cal/mol)   |                   |      |      |
| $\theta = 535.285$ (K)   |                   |      |      |
| $E_D = 37,694.6$ (cal/mol)   |                   |      |      |
| $T$ : 溫度 (K)   |                   |      |      |
| $R = 1.987$ (cal/mol · K)  |                   |      |      |

(13) UO<sub>2</sub>粒成長

UO<sub>2</sub>粒成長の物性値は以下のオプションから選択する。

| UO <sub>2</sub> 粒成長   | Itoh (modified Ainscough) | 使用条件 | ref. |
|---|---------------------------|------|------|
| $\frac{dD}{dt} = K \left( \frac{1}{D} - \frac{1 + E \cdot N_f / N_f^{\max}}{D_m} \right)$ <p>D : 時間 t における粒径 (μm)</p> <p>t : 時間 (h)</p> <p>K : 速度定数 (μm<sup>2</sup>/h)</p> $K = 5.24 \times 10^7 \exp(-2.67 \times 10^5 / RT)$ <p>R=8.314 (J/mol · K)</p> <p>D<sub>m</sub> : 限界粒径 (μm)</p> $D_m = 2.23 \times 10^3 \exp(-7620/T)$ <p>T : 温度 (K)</p> <p>E : フィッティングパラメータ</p> <p>N<sub>f</sub> : 粒界での FP ガス原子密度 (atoms/cm<sup>2</sup>)</p> <p>N<sub>f</sub><sup>max</sup> : 粒界での FP ガス原子密度の飽和値 (atoms/cm<sup>2</sup>)</p> | IGRAIN=0<br>(標準値)         | 31   |      |

なお、IGRAIN=0 の場合の調整パラメータは以下のとおりである。

| 変数名  | 内容               | 標準値 |
|------|------------------|-----|
| AG   | フィッティングパラメータ E   | 1.0 |
| GRWF | 粒成長速度を GRWF 倍する。 | 1.5 |

| UO <sub>2</sub> 粒成長 (2)  | Ainscough | 使用条件 | ref. |
|--|-----------|------|------|
| $\frac{dD}{dt} = k \left( \frac{1}{D} - \frac{1 + 0.002B}{D_m} \right)$ <p>D : 時間 t における粒径 (μm)</p> <p>t : 時間 (h)</p> <p>k : 速度定数 (μm<sup>2</sup>/h)</p> $k = 5.24 \times 10^7 \exp(-2.67 \times 10^5 / RT)$ <p>R=8.314 (J/mol · K)</p> <p>T : 温度 (K) ; 温度範囲 : 1,300~1,500°C</p> <p>B : 燃焼度 (Mwd/tU)</p> | IGRAIN=1  | 32   |      |

|  |          |    |
|--|----------|----|
| UO <sub>2</sub> 粒成長 (3)<br>$D^2 - D_o^2 = k_o t^{0.8} \exp(-87,000 / RT)$<br>$D$ : 時間 t における粒径 ( $\mu\text{m}$ )<br>$D_o$ : 初期粒径 ( $\mu\text{m}$ )<br>$k_o$ : 比例定数 ( $k_o = 3.9 \times 10^{10}$ )<br>$t$ : 時間 (h)<br>$R$ : ガス定数 1.987 (cal/mol · K)<br>$T$ : 温度 (K) ; 温度範囲 : 1,555~2,440°C   | IGRAIN=2 | 49 |
| UO <sub>2</sub> 粒成長 (4)<br>$D^3 - D_o^3 = k_o e^{-Q/RT} \cdot t$<br>$D$ : 時間 t における粒径 ( $\mu\text{m}$ )<br>$D_o$ : 初期粒径 ( $\mu\text{m}$ )<br>$k_o$ : 速度定数 ( $\mu\text{m}^3/\text{h}$ )<br>$Q$ : 粒成長に必要な活性化エネルギー (cal/mol)<br>$R = 1.987$ cal/mol · K<br>$T$ : 温度 (K)<br>$t$ : 時間 (h)<br>$K_o = \exp(5.096 + 2.476 \times 10^{-4} \cdot Q)$ | IGRAIN=3 | 50 |
| Mac Ewan の実験データに対して $Q=119,000$ (cal/mol)  |          |    |
| UO <sub>2</sub> 粒成長 (5)<br>$D^4 - D_o^4 = 6.18 \times 10^{13} e^{-92,400/RT} \cdot t$<br>$D$ : 時間 t における粒径 ( $\mu\text{m}$ )<br>$D_o$ : 初期粒径 ( $\mu\text{m}$ )<br>$R = 1.987$ ( cal/mol · K)<br>$T$ : 温度 (K)<br>$t$ : 時間 (h)   | IGRAIN=4 | 23 |

## (14)ペレット融点

ペレット融点の物性式を示す。

|  |      |      |
|--|------|------|
| ペレット融点 MATPRO-Version 11<br>$T_m = T_u - 5.414P + 0.007468P^2 - 0.0032Bu$<br>$T_m$ : ペレット融点 (°C)<br>$T_u$ : UO <sub>2</sub> の未照射材の融点 (=2,800°C)<br>$P$ : PuO <sub>2</sub> のモル分率 (%) 、 $Bu$ : 燃焼度 (MWd/t) | 使用条件 | ref. |
|  | 常時   | 51   |

## (15)FP ガス放出率

FP ガス放出・モデルは、以下のオプションより選択する。

| FP ガス放出率 (1)   | 機構論的モデル                    | 使用条件   | ref.                      |
|--|----------------------------|--|---------------------------|
| 2.1.4 項 (2) を参照<br>調整パラメータについても 2.1.4 項 (2) 中に記述している。  |                            | IGRASP=0<br>(標準値)                                      |                           |
| FP ガス放出率 (2)   | 温度依存モデル                    |  |                           |
| $f = \frac{1}{V} \sum_i a_i V_i$<br>$V_i$ : UO <sub>2</sub> ペレット断面を、温度勾配に基づいて同心円状に分割した各領域の単位長さ当たりの体積<br>$V = \sum_i V_i$<br>$a_i$ : 領域 $i$ における放出率 |                            | IGASP=1<br>(各モデル共に共通)                                  | *                         |
| 提案者  | データ                        |  |                           |
|  | i                          | 領 域  | ai                        |
| R.C.Nelson   | i = 1<br>= 2<br>= 3        | >1,900°C<br>1,650~1,900°C<br><1,650°C                  | 100%<br>20%<br>0%         |
| 森 島  | i = 1<br>= 2<br>= 3        | >1,900°C<br>1,650~1,900°C<br><1,650°C                  | 100%<br>20%<br>0.5%       |
| W.B.Lewis  | i = 1<br>= 2<br>= 3<br>= 4 | >1,600°C<br>1,300~1,600°C<br>1,000~1,300°C<br><1,000°C | 95%<br>60%<br>10%<br>0.5% |
| G.Karsten  | i = 1<br>= 2<br>= 3        | >1,700°C<br>1,300~1,700°C<br><1,300°C                  | 95%<br>50%<br>10%         |

## 2.3.2 ジルカロイ被覆管物性値

### (1) 被覆管熱伝導度

| ジルカロイ熱伝導度   | MATPRO-Version 09 | 使用条件 | ref. |
|---|-------------------|------|------|
| R.T.～融点に対して<br>$k = 7.51 + 2.09 \times 10^{-2} T - 1.45 \times 10^{-5} T^2 + 7.67 \times 10^{-9} T^3$<br>k : 热伝導度 (W/m · K)<br>T : 温度 (K) |                   | 常時   | 23   |

### (2) 被覆管酸化膜の熱伝導度

| ZrO <sub>2</sub> 熱伝導度  | MATPRO-A | 使用条件 | ref. |
|--|----------|------|------|
| $k = 0.835 + 1.81 \times 10^{-4} T$<br>k : ZrO <sub>2</sub> 熱伝導度 (W/m · K)<br>T : 温度 (K) |          | 常時   | 21   |

なお、酸化膜熱伝導度式には以下の調整パラメータがある。

| 変数名  | 内容  | 標準値 |
|------|---|-----|
| CNOX | ZrO <sub>2</sub> の熱伝導式は<br>$K = (0.835 + 1.81 \times 10^{-4} \cdot T) \cdot f$<br>$f = 1 - CNOX \cdot S$<br>S : 酸化膜厚(μm)<br>で与える。<br>したがって、CNOX は酸化膜熱伝導度に酸化膜の厚みの効果を入れるファクターである。 | 0.0 |

## (3) ジルカロイ熱膨張

ジルカロイ熱膨張は、軸方向熱膨張のみ以下のオプションより選択する。

| ジルカロイ熱膨張 (1)  | MATPRO-Version 09 | 使用条件              | ref. |
|---|-------------------|-------------------|------|
| 27~800°Cに対して<br>軸方向熱膨張 : (Subcode CATHEX)<br>$\Delta L / L_0 = -2.506 \times 10^{-5} + 4.441 \times 10^{-6} T$<br>したがって熱膨張係数は $\alpha = 4.441 \times 10^{-6}$<br>半径方向熱膨張 : ( Subcode CDTHEX)<br>$\Delta D / D_0 = -2.373 \times 10^{-4} + 6.721 \times 10^{-6} T$<br>したがって $\alpha = 6.721 \times 10^{-6}$<br>T: 温度 (°C)<br>$\alpha$ : 热膨張係数 (°C⁻¹) |                   | ICATHX=0<br>(標準値) | 23   |
| ジルカロイ熱膨張 (2)  | Scott             |                   | *    |
| 21~429°Cに対して<br>軸方向熱膨張<br>$\Delta L / L_0 = 42.53230 + 3.96753 T$<br>( in / in ) $\times 10^{-6}$<br>T: 温度 (°C)   |                   | ICATHX=1          |      |

なお、ICATHX=0 の場合には以下の調整パラメータがある。

| 変数名   | 内容   | 標準値                    |
|-------|--|------------------------|
| ATHEX | ジルカロイの軸方向熱膨張係数を ATHEX で与える。<br>標準値の場合が MATPRO-09 の値である。  | $4.441 \times 10^{-6}$ |
| RTHEX | ジルカロイの半径方向熱膨張係数を RTHEX で与える。<br>標準値の場合が MATPRO-09 の値である。 | $6.721 \times 10^{-6}$ |

## (4) ヤング率

ジルカロイのヤング率

| ジルカロイヤング率  | Fisher | 使用条件 | ref. |
|--|--------|------|------|
| $E = [9.900 \times 10^5 - 566.9 \times (T - 273.15)] \times 9.8067 \times 10^4$<br>E: ヤング率 (Pa), T: 温度 (K) |        | 常時   | 53   |

酸化膜のヤング率

| ZrO <sub>2</sub> ヤング率   | MATPRO-A | 使用条件 | ref. |
|---|----------|------|------|
| $E = 1.367 \times 10^{11} - 3.77 \times 10^7 T$<br>E: ZrO <sub>2</sub> ヤング率 (Pa)<br>T: 温度 (K) |          | 常時   | 21   |

## (5) 被覆管ポアソン比

|  |        |      |      |
|--|--------|------|------|
| ジルカロイポアソン比   | Fisher | 使用条件 | ref. |
| $\nu = 0.3303 + 8.376 \times 10^{-5} (T - 273.15)$ |        | 常時   | 53   |
| T : 温度 (K)   |        |      |      |

## 酸化膜のポアソン比

|                        |          |      |      |
|------------------------|----------|------|------|
| ZrO <sub>2</sub> ポアソン比 | MATPRO-A | 使用条件 | ref. |
| $\nu = 0.30$           |          | 常時   | *    |

## (6) ジルカロイクリープ

|  |                   |      |      |
|--|-------------------|------|------|
| ジルカロイクリープ(1)   | MATPRO-Version 09 | 使用条件 | ref. |
| 照射下クリープ式<br>$\dot{\epsilon} = K\phi(\sigma + Be^{C\sigma}) \exp(-10,000 / RT)t^{-\frac{1}{2}}$<br>$\dot{\epsilon}$ : 二軸クリープひずみ速度 (m/m · s)<br>$K = 5.129 \times 10^{-29}$ , $B = 7.252 \times 10^2$ , $C = 4.967 \times 10^{-8}$<br>$R = 1.987$ (cal/mol · K), $T$ : 温度 (K), $t$ : 時間 (s)<br>$\phi$ : 高速中性子数 (n/m <sup>2</sup> · s) $E > 1.0$ MeV<br>$\sigma$ : 周方向応力 (N/m <sup>2</sup> )  | CRPEQ=0           | 23   |      |
| ジルカロイクリープ (2)  | 燃安専               |      |      |
| Zry-4 用 照射下クリープ式 :<br>$\dot{\epsilon}^c = \dot{\epsilon}_{th}^c + \dot{\epsilon}_{irr}^c$ (1/hr)   |                   |      |      |
| 1) 热クリープひずみ速度 : 热クリープひずみを<br>$\epsilon_{th}^c = K \cdot t^m$<br>とすると、<br>$\dot{\epsilon}_{th}^c = mK^{\frac{1}{m}} \epsilon_H^{(1-\frac{1}{m})}$<br>$\epsilon_H (= \epsilon_{th}^c) = \sum_{k=1}^n \dot{\epsilon}_{th,k}^c \cdot \Delta t_k$ : 前タイムステップ(n-1)までの<br>热クリープひずみ<br>$K = \exp\{-13.3 + (-0.416 + 8.22 \times 10^{-4} T)\sigma_{eq} + 6.59 \times 10^{-3} T\}$<br>$m = -1.07 + (-0.00343 + 7.27 \times 10^{-5} T)\sigma_{eq} + 1.95 \times 10^{-3} T$<br>$\sigma_{eq}$ : 相当応力 (kgf/mm <sup>2</sup> )<br>$T$ : 温度 (K) | CRPEQ=1           | 26   |      |
| 2) 照射クリープひずみ速度 : (ただし、本式のソースは不明)<br>$\dot{\epsilon}_{irr}^c = 6.64 \times 10^{-25} \phi^{1.23} \sigma_{eq}^{1.34}$<br>$\phi$ : 高速中性子束 (n/cm <sup>2</sup> s)  |                   |      |      |

なお、ジルカロイクリープ式には、以下の調整パラメータがある。

| 変数名   | 内容   | 標準値 |
|-------|--|-----|
| CRFAC | SR 材の場合、クリープひずみ速度を CRFAC 倍する。                    | 1.3 |
| IPUGH | IPUGH=0: Pugh の反転を考慮しない。 IPUGH=1: Pugh の反転を考慮する。 | 0   |

ここで、応力反転による被覆管クリープの Pugh の反転について説明する。

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、Pugh は簡便法を提案した<sup>(54)</sup>。Pugh の方法の大要は次のようにある。

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

$$\{\dot{\varepsilon}_c\} = \left\{ \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \right\} f(\bar{\sigma}, \bar{\varepsilon}^H, T) \quad (2.3.11)$$

とする。

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

$$\hat{\varepsilon} = \varepsilon_H, \bar{\varepsilon}^H = 0 \quad (2.3.12)$$

とする。

3) 第 2 回目以降の反転時には、

$$\bar{\varepsilon}^H \geq \hat{\varepsilon} \text{ なら } \hat{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}^H = 0, \bar{\varepsilon}^H = 0$$

$$\bar{\varepsilon}^H < \hat{\varepsilon} \text{ なら } \bar{\varepsilon}^H = \hat{\varepsilon} - \bar{\varepsilon}^H$$

とする。

これらを図示すれば図 2.43 のようになる。

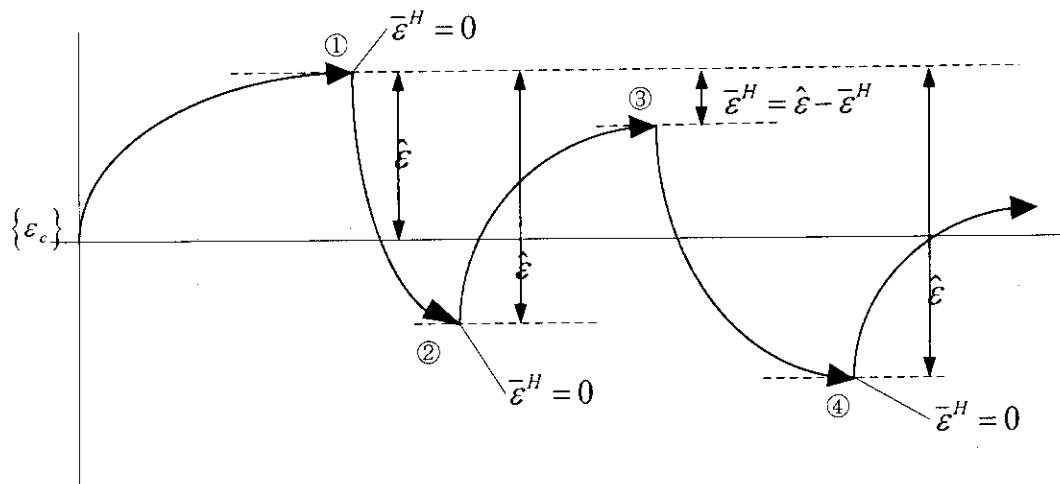


図 2.43 応力の反転によるクリープひずみの反転

なお、応力反転の判定は、クリープ式が

$$\{\dot{\varepsilon}_c\} = \left\{ \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \right\} f(\bar{\sigma}, \bar{\varepsilon}^H, T), f \geq 0 \quad (2.3.13)$$

であるので、 $\{\dot{\varepsilon}_c\}$ の符号が前タイムステップと現ステップで反転したか否かによって、決定する。  
多軸応力状態でのこの符号の反転判定は、 $\{\dot{\varepsilon}_c\}$ の成分のスカラー積の符号による。

### (7) ジルカロイ塑性

ジルカロイ歪硬化

| ジルカロイ歪硬化曲線式  | 計算条件 | ref. |
|--|------|------|
| $\sigma = K\varepsilon^n$<br>$\sigma$ : 真応力 ( $\text{kg/mm}^2$ ) 、 $\varepsilon$ : 真ひずみ、 $n$ : 歪硬化指数<br>$K = K_{0.2\%} \left( \frac{K_{0.2\%}}{E} + 0.002 \right)^{-n}$<br>$K_{0.2\%} = \sigma_y + 33.44(1 - \exp(-B\phi t))^{1/2} \quad (\text{kg/mm}^2)$<br>$B = 2.92 \times 10^{-21} \exp(1 - 1.6 \times 10^{-14} \phi)$<br>$\phi$ : 高速中性子束 ( $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$ ) $E > 1 \text{ MeV}$<br>$\sigma_y$ = 降伏応力 ( $\text{kg/mm}^2$ )<br>= 21.60 - 0.0213 · T (再焼結材)<br>= 31.32 - 0.0213 · T (応力除去材)<br>$n = 0.0504 + 0.0001435 \cdot T$<br>$T$ : 温度 ( $^\circ\text{C}$ ) $220 \leq T \leq 450 \text{ }^\circ\text{C}$ | 常時   | 1    |

ジルカロイ歪硬化曲線式については、次の調整パラメータがある。

| 変数名  | 内容  | 標準値 |
|------|---|-----|
| ISTR | $ISTR \neq 0$ の場合には $K = \sigma_y + 33.44$ とする。 | 0   |

### (8) ジルカロイ照射成長

ジルカロイ照射成長の物性式は以下のオプションより選択する。

| ジルカロイ照射成長 (1)  | MATPRO-Version 09 | 使用条件 | ref. |
|--|-------------------|------|------|
| $\frac{\Delta L}{L} = A [\exp(240.8 / T)] [\phi t]^{1/2} [1 - 3f_z] [1 + 2.0CW]$<br>$\frac{\Delta L}{L}$ : 照射成長 (-)<br>$A = 1.407 \times 10^{-16} (n / m^2)^{-1/2}$<br>$T$ : 温度 ( $^\circ\text{K}$ )<br>$\phi t$ : 高速中性子照射量 ( $n / m^2$ ) ( $E \geq 1 \text{ MeV}$ )<br>$f_z$ : 軸方向ファクター<br>$CW$ : コールドワーク | ICAGRW<br>=1      |      | 23   |

ICAGRW=1 の場合には、以下の調整パラメータがある。

| 変数名    | 内容             | 標準値  |
|--------|----------------|------|
| CATEXF | 軸方向ファクター $f_z$ | 0.05 |
| COLDW  | コールドワーク CW     | 0.81 |

| ジルカロイ照射成長 (2)  | Manzel  | 使用条件      | ref. |
|--|---------|-----------|------|
| $\frac{\Delta L}{L_o} = 0.1 \left( \phi \cdot t / 10^{21} \right)^n$               |         |           |      |
| $\frac{\Delta L}{L_o}$ : 照射成長 (%)  |         | ICAGRW =2 | *    |
| $\phi \cdot t$ : 高速中性子フルエンス ( $n/cm^2$ )   |         |           |      |
| $n$ : 0.65~0.67 の範囲の定数 (0.66 を使用)  |         |           |      |
| ジルカロイ照射成長 (3)  | Hanerz  |           |      |
| $\left( \frac{\Delta L}{L_o} \right)_{\perp c} = 6 \times 10^{-12} (\phi t)^{0.4}$ |         | ICAGRW =3 | *    |
| $\left( \frac{\Delta L}{L_o} \right)_{\perp c}$ : ジルカロイ単結晶の C 軸に直角方向における照射成長 (-)   |         |           |      |
| $\phi \cdot t$ : 高速中性子フルエンス ( $n/cm^2$ )   |         |           |      |
| ジルカロイ照射成長 (4)  | Hesketh |           |      |
| $\frac{\Delta L}{L_o} = A \cdot \sqrt{\phi \cdot t}$                               |         | ICAGRW =4 | 55   |
| $\frac{\Delta L}{L_o}$ : 照射成長 (-)  |         |           |      |
| $\phi \cdot t$ : 高速中性子フルエンス ( $n/cm^2$ )   |         |           |      |
| $A$ : フィッティング定数 ( $= 5 \times 10^{-14}$ )  |         |           |      |

## (9) ジルカロイ比熱

| ジルカロイ比熱  | MATPRO-Version 09 | 使用条件 | ref. |
|--|-------------------|------|------|
| $C_p = 245.11 + 0.15558T - 3.3414 \times 10^{-5} T^2$                        |                   |      |      |
| $C_p$ : 比熱 (J/kg · K)  |                   | 常時   | 23   |
| $T$ : 温度 (K) (300-1090K)   |                   |      |      |
| ZrO <sub>2</sub> 比熱  | Couglin           | 使用条件 | ref. |
| $C_p = 46.48 + 2.134T - 2.936 \times 10^{-3} T^2 + 1.433 \times 10^{-6} T^3$ |                   |      |      |
| $C_p$ : 比熱 (J/kg · K)  |                   | 常時   | *    |
| $T$ : 温度 (K)   |                   |      |      |

## (10) ジルカロイ密度

| ジルカロイ密度                               | MATPRO-Version 09 | 使用条件 | ref. |
|---------------------------------------|-------------------|------|------|
| $\rho = 6.55 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ |                   | 常時   | 23   |
| ZrO <sub>2</sub> 密度                   |                   | 使用条件 | ref. |
| $\rho = 5.6 \text{ (g/cm}^3\text{)}$  |                   | 常時   | 21   |

## (11) 被覆管腐食

被覆管の腐食速度は以下のオプションより選択する。

| 被覆管腐食速度 (1)   | EPRI | 使用条件     | ref. |
|---|------|----------|------|
| 被覆管腐食速度 : $dS / dt = (A / S^2) \exp(-Q_1 / RT)$<br>遷移後腐食速度 : $dS / dt = C \exp(-Q_2 / RT),$<br>$C = C_0 + U(M\phi)^p$<br>遷移の生じる酸化膜厚 : $D \exp(-Q_3 / RT - ET)$<br>$dS / dt$ : 腐食速度 ( $\mu\text{m/day}$ )<br>$S$ : 酸化膜厚 ( $\mu\text{m}$ )<br>$T$ : 酸化膜と金属相の界面温度 (K)<br>$\phi$ : 高速中性子束 ( $n / \text{cm}^2 \text{s}$ )<br>$R$ : 気体定数 ( $1.987 \text{ cal/mol} \cdot \text{K}$ )<br>$A = 6.3 \times 10^9 (\mu\text{m}^3 / \text{day})$ $Q_1 = 32289 (\text{cal/mol})$<br>$C_0 = 8.04 \times 10^7 (\mu\text{m/day})$ $U = 2.59 \times 10^8 (\mu\text{m/day})$<br>$M = 7.46 \times 10^{-15} (\text{cm}^2 \text{s} / n)$ $P = 0.24$<br>$Q_2 = 27354 (\text{cal/mol})$ $D = 2.14 \times 10^7 (\mu\text{m})$<br>$Q_3 = 10763 (\text{cal/mol})$ $E = 1.17 \times 10^{-2} (K^{-1})$ |      | ICOPRO=1 | 22   |

|   |          |         |    |
|---|----------|---------|----|
| 被覆管腐食速度 (2)   | MATPRO-A |         |    |
| 遷移前 : $S = (4.976 \times 10^{-3} A \cdot t \cdot \exp(-15660 / T) + S_o^3)^{1/3}$ |          | ICORRO= |    |
| 遷移後 : $S = 82.88A \cdot t \cdot \exp(-14080 / T) + S_{TRAN}$                      |          | 2 (PWR) |    |
| 遷移時の酸化膜厚 : $S_{TRAN} = 7.749 \times 10^{-6} \exp(-790 / T)$                       |          |         | 21 |
| $S$ : 酸化膜厚 (m)  |          | ICORRO= |    |
| $t$ : 時間 (days)   |          | 3 (BWR) |    |
| $A$ : 1.5 (for PWR) , =9 (for BWR)  |          |         |    |

なお、ICORRO=0 (標準値) の場合には被覆管の腐食を考慮しない。

被覆管腐食には以下の調整パラメータがある。

| 変数名    | 内容  | 標準値 |
|--------|---|-----|
| FCORRO | 酸化膜成長速度の加速因子<br>$\frac{ds}{dt} = (1 + 0.04\Delta T \cdot FCORRO) \frac{ds}{dt}$ $\Delta T$ : 酸化膜内外面 (金属相との境界面-冷却水側)<br>での温度差 (°C)<br>とする。 | 0.0 |

## 2.3.3 その他の物性値

### (1) ギャップ熱伝達

ギャップコンダクタンスモデルは以下のオプションより選択する。

| ギャップコンダクタンス (1)   | Ross & Stoute     | 使用条件         | ref. |
|---|-------------------|--------------|------|
| 2.1.2 項参照。なお、ヘリウム、窒素、クリプトン、キセノンの熱伝導度は<br>以下のとおりである。(MAPRO-Version 09)                 |                   |              |      |
| $K_{He} = 3.366 \times 10^{-3} T^{0.668}$   |                   | IGAPCN<br>=0 |      |
| $K_{N_2} = 2.091 \times 10^{-3} T^{0.846}$  |                   | (標準値)        | 25   |
| $K_{Kr} = 4.726 \times 10^{-5} T^{0.923}$   |                   |              |      |
| $K_{Xe} = 3.366 \times 10^{-5} T^{0.872}$   |                   |              |      |
| K : 熱伝導度 (W/m·k)  |                   |              |      |
| T : 温度 (K)  |                   |              |      |
| ギャップコンダクタンス (2)   | MATPRO-Version 09 |              |      |
| $h_{gap} = (1 - F)h_o + Fh_c$   |                   |              |      |
| $h_{gap}$ : ギャップコンダクタンス ( $W / m^2 \cdot K$ )   |                   | IGAPCN       |      |
| $h_o$ : 非接触ギャップコンダクタンス ( $W / m^2 \cdot K$ )  |                   | =1           | 23   |
| $h_c$ : 接触ギャップコンダクタンス ( $W / m^2 \cdot K$ )   |                   |              |      |
| F : ペレット一被覆管接触部の円周割合  |                   |              |      |
| $h_o = \frac{K_{mix}}{\Delta r + \delta}$   |                   |              |      |
| $K_{mix}$ : 混合ガスの熱伝導度 ( $W / m \cdot K$ )   |                   |              |      |
| →補助物性値 1  |                   |              |      |
| $\delta$ : ペレット一被覆間表面の rms 粗さ (m)   |                   |              |      |
| $\delta = 4.4 \times 10^{-6}$   |                   |              |      |
| $\Delta r$ : ホットギャップ幅 (m)   |                   |              |      |
| $h_c = 5 \times 10^{-4} \cdot P^n + \frac{K_{mix}}{\delta}$                           |                   |              |      |
| P : ペレット一被覆管の接触圧 ( $N / m^2$ )  |                   |              |      |
| F<1 のとき P=0   |                   |              |      |
| 0<P<1,000 psi では n=1  |                   |              |      |
| P>1,000 psi では n=0.5  |                   |              |      |
| $F = \frac{1}{a_1 \left( \frac{\Delta r \cdot 100}{R_F} \right)^{a_2} + 1.429} + 0.3$ |                   |              |      |
| $R_F$ : ペレットのホット直径 (m)  |                   |              |      |
| $a_1, a_2$ : 燃焼度 (x) 依存の定数  |                   |              |      |

$x > 600 \text{ MWd/t-U}$  の場合

$$a_1 = 100 - 98F'$$

$$a_2 = 4 - 0.5F'$$

$$F' = 1 - \frac{1}{\left(\frac{x-600}{1000}\right)^4 + 1}$$

$x \leq 600 \text{ MWd/t-U}$  の場合

$$a_1 = 100$$

$$a_2 = 4$$

ギャップコンダクタンス (3)

Ross and Stout.

$$h_{gap} = h_g + h_s$$

$h_{gap}$  : ギャップコンダクタンス ( $\text{W/cm}^2 \cdot \text{°C}$ )

$h_g$  : 非接触ギャップコンダクタンス ( $\text{W/cm}^2 \cdot \text{°C}$ )

$h_s$  : 接触ギャップコンダクタンス ( $\text{W/cm}^2 \cdot \text{°C}$ )

$$h_g = \frac{K_g}{C(R_1 + R_2) + (g_1 + g_2) + \Delta r}$$

$K_g$  : ギャップガス熱伝導度 ( $\text{W/cm} \cdot \text{°C}$ )

He : 0.0021, Ar : 0.00029, Kr : 0.0001

C : 接触圧に関する定数

$C = 2.5$  for  $100 \text{ kgf/cm}^2$

$C = 1.5$  for  $500 \text{ kgf/cm}^2$

$R_1$  および  $R_2$  : ペレットおよび被覆管の表面粗さ (cm)

$g_1$  および  $g_2$  : temperature jump distance (cm)

He :  $10 \times 10^{-4}$ , Ar :  $5 \times 10^{-4}$ , Kr :  $1 \times 10^{-4}$

Xe :  $< 1 \times 10^{-4}$  ( $g_1 + g_2$  の値)

$\Delta r$  : ホットギャップ巾 (cm)

$$h_s = \frac{K_m \cdot P}{a \cdot H}$$

$$K_m = \frac{2K_1 \cdot K_2}{K_1 + K_2}$$

$$P = \frac{2t \cdot Ys}{ID}$$

$$a = a_o \sqrt{R}$$

$$R = \sqrt{\frac{1}{2}(R_1^2 + R_2^2)}$$

$K_1$  および  $K_2$  : ペレットおよび被覆管の熱伝導度 ( $\text{W/cm} \cdot \text{°C}$ )

$$\left. \begin{array}{l} K_1 = 0.038 \\ K_2 = 0.14 \end{array} \right\} K_m = 0.05977$$

25

IGAPCN

=2

|   |              |   |
|---|--------------|---|
| <p>P : 接触圧 <math>(kgf/cm^2)</math></p> <p>t : 被覆管厚さ (cm)</p> <p>ID : 被覆管内径 (cm)</p> <p>Y<sub>s</sub> : 被覆管降伏応力 <math>(Y_s = 1,980 kgf/cm^2)</math></p> <p>a : 接触部の平均半径 (cm)</p> <p><math>a_o = 0.5cm^{1/2}</math></p> <p>H : 軟らかい側のマイヤー硬度 <math>(kg/cm^2)</math></p> <p><math>h=3 \cdot Y_s</math></p>  |              |   |
| <p>ギャップコンダクタンス (4)                                  Dean</p> <p><math>h_{gap} = h_s + h_g</math></p> <p><math>h_{gap}</math> : ギャップコンダクタンス <math>(Btu/h \cdot ft^2 \cdot {}^\circ F)</math></p> <p><math>h_g</math> : 非接触ギャップコンダクタンス <math>(Btu/h \cdot ft^2 \cdot {}^\circ F)</math></p> <p><math>h_s</math> : 接触ギャップコンダクタンス <math>(Btu/h \cdot ft^2 \cdot {}^\circ F)</math></p> <p><math>h_s = 280 \cdot \frac{P}{M_2} \cdot \frac{K_1 \cdot K_2}{K_1 + K_2} \cdot \left( \frac{1}{\lambda_1 \cdot \lambda_2} \right)^{1/2}</math></p> <p>P : 接触圧 (psi) ; P=267~675psi (18.6~45.7kgf/cm<sup>2</sup>)</p> <p>M<sub>2</sub> : ジルカロイのマイヤー硬度 (psi)</p> <p>M<sub>2</sub>=120,000psi (84.4kg/cm<sup>2</sup>)</p> <p>K<sub>1</sub>およびK<sub>2</sub> : ペレットおよび被覆管の熱伝導度</p> <p><math>K_1 = 2.20 Btu/h \cdot ft \cdot {}^\circ F (0.038W/cm \cdot {}^\circ C)</math></p> <p><math>K_2 = 8.09 Btu/h \cdot ft \cdot {}^\circ F (0.14W/cm \cdot {}^\circ C)</math></p> <p><math>\lambda_1</math>および<math>\lambda_2</math> : ペレットおよび被覆管の表面プロファイルの波長 (in)</p> <p><math>\lambda_1 \cdot \lambda_2 \sim RUo_2</math></p> <p><math>R_{Zr}</math> (粗さ) = <math>50_{-5}^{+10} \times 10^{-6} rms (in)</math></p> <p><math>h_g = \frac{K_g}{0.52 \cdot \delta}</math></p> <p><math>K_g</math> : ギャップガス熱伝導度 <math>(Btu/h \cdot ft \cdot {}^\circ F)</math></p> <p>Ar : 0.0168, He : 0.139, FP : 0.0088</p> <p><math>\delta</math> : ペレット-被覆管ギャップ (ft) ; <math>\delta \sim Ru_o</math></p> <p>modified Dean</p> <p><math>h_s = 0.6P, \quad h_g = \frac{K_g}{\delta + 14.4 \times 10^{-6}}</math></p> | IGAPCN<br>=3 | * |

なお、IGAPCN=0,2 の場合には、以下の調整パラメータがある。

| 変数名 | 内容                   | 標準値 |
|-----|----------------------|-----|
| R1  | ペレット表面粗さ ( $\mu m$ ) | 1.0 |

## (2) 被覆管表面熱伝達

被覆管表面熱伝達の物性式を示す。

| 被覆管表面熱伝達 (1)   | Jens-Lottes    | 使用条件 |    |
|--|----------------|------|----|
| 2相状態の場合に使用する。<br>$h_w = 0.1263 \cdot \exp\left(\frac{P_w}{6.201 \times 10^6}\right) q_s^{0.75}$ <p style="margin-left: 40px;"><math>h_w</math> : 表面熱伝達係数 (<math>W / cm^2 \cdot K</math>)<br/> <math>P_w</math> : 冷却水圧力 (<math>N / m^2</math>)<br/> <math>q_s</math> : 被覆管外面熱流束 (<math>W / cm^2</math>)</p> | 常時             | 20   |    |
| 被覆管表面熱伝達 (2)   | Dittus-Boelter | 常時   | 19 |

サブクール状態の場合に使用する。

$$h_w = 0.023 \frac{k}{De} \left( \frac{DeV\rho}{\mu} \right)^{0.2} \cdot (p_r)^{0.4}$$

$h_w$  : 表面熱伝達係数 ( $W / m^2 \cdot K$ )

$k$  : 冷却水熱伝導度 ( $W / m^2 \cdot K$ )

$De$  : 等価直径 (m)

$V$  : 冷却水速度 (m/s)

$\rho$  : 冷却水密度 ( $kg / m^3$ )

$\mu$  : 冷却水の粘度 ( $kg / m \cdot s$ )

$p_r$  : プラントル数

被覆管表面熱伝達には、以下の調整パラメータがある。

| 変数名   | 内容                     | 標準値 |
|-------|------------------------|-----|
| AKFAC | 被覆管表面熱伝達係数を AKFAC 倍する。 | 1.0 |

## (3) FP ガス拡散定数

| FP ガス拡散定数  | Turnbull | 使用条件 | ref. |
|--|----------|------|------|
| $D = 7.6 \times 10^{-10} \exp(-7 \times 10^4 / RT) + S^2 jvV \div 2 \times 10^{-40} F \quad (m^2 / s)$<br>$R$ : ガス定数 = 1.987 (cal/mol/K)<br>$T$ : 温度 (K)<br>$S$ : 原子ジャンプ距離 = $\Omega^{2/3}$<br>$\Omega$ : 原子容積 = $4.09 \times 10^{-29} (m^3)$<br>$jv = 10^{13} \exp(-5.52 \times 10^4 / RT)$<br>$V = \frac{(\partial_s S^2 + ZV_o)}{2Z} \left[ \left( 1 + \frac{4K'Z}{jv(\partial_s S^2 + ZV_o)^2} \right)^{1/2} - 1 \right]$<br>$\partial_s = 10^{15} \quad (m^{-2}, \text{シンク強度})$<br>$Z = 2 \quad (\text{欠損点数})$<br>$K' = 10^4 \quad (\text{原子当りの欠損率})$<br>$V_o = \exp(-5.52 \times 10^4 / RT)$<br>$F = 10^{19} \quad (fissions / m^3 \cdot sec, \text{核分裂速度})$ | IGASP=0  | 30   |      |

## (4) He-Xe ガス相互拡散定数

| He-Xe ガス相互拡散定数  | Present | 使用条件 | ref. |
|---|---------|------|------|
| $D^{12} = \frac{3}{8} \left( \frac{\pi k T}{2m^*} \right)^{1/2} \frac{1}{n \pi d_{12}^2} \quad (m^2 / s)$<br>$m^* = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \quad (m : 1 \text{ 分子の重量})$<br>$d_{12} = \frac{1}{2} (d_1 + d_2) \quad (d : \text{分子の直径})$<br>$= 3.45 \times 10^{-10} \quad (m)$<br>$n = n_1 + n_2 \quad (\text{分子密度})$<br>$k \quad : \text{ボルツマン定数} \quad (= 1.380 \times 10^{-16} erg / K)$<br>$T \quad : \text{温度} \quad (K)$ | 常時      | 35   |      |

## 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, AERI -1298 (1985)
- (2) Nakajima T., FEMAXI-IV:A Computer Code for the Analysis of Fuel Rod Behavior under Transient Conditions, Nucl. Eng. Design 88, p.69-84 (1985)
- (3) Nakajima T. and Saito H., A Comparison between Fission Gas Release Data and FEMAXI-IV Code Calculations , Nucl. Eng. Design 101, p.267-279 (1987)
- (4) Nakajima T., Saito H. and Osaka T., Analysis of Fission Gas Release from UO<sub>2</sub> Fuel during Power Transients by FEMAXI-IV Code, IWGFPT-27.259, p.140-162 (1987)
- (5) Nakajima T. and Ki-Seob Sim, Analysis of Fuel Behavior in Power-Ramp Tests by FEMAXI-IV Code, Res Mechanica 25, p.101-128 (1988)
- (6) Nakajima T., Saito H. and Osaka T., Fuel Behavior Modelling Code FEMAXI-IV and Its Application, IAEA-T1-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)
- (7) Uchida M., Benchmarking of FEMAXI-IV Code with Fuel Irradiation Data in Power Reactors, JAERI-M 90-002 (1990)
- (8) Nakajima T., Saito H., and Osaka T., FEMAXI-IV:A Computer Code for the Analysis of Thermal and Mechanical Behavior of Light Water Reactor Fuel Rods, Trans.11<sup>th</sup> Int. Conf. on SMIRT (Tokyo, Japan), 6297 PV.C-D, p.1-6 (1991)
- (9) Nakajima T., Saito H., and Osaka T., FEMAXI-IV:A Computer Code for the Analysis of Thermal and Mechanical Behavior of Light Water Reactor Fuel Rods, Nucl. Eng. Design 148, p.41-52 (1994)
- (10) 鈴木元衛、斎藤裕明、軽水炉燃料解析コード FEMAXI-IV(ver.2)の詳細構造とユーザーズマニュアル、JAERI Data/Code 97-010 (1997)
- (11) Suzuki M. and Saitou H., Light Water Reactor Fuel Analysis Code FEMAXI-IV(Ver.2) -Detailed Structure and User's Manual-, JAERI Data/Code 97- 043 (1997)
- (12) Jackson P.A., Turnbull J.A. and White R.J., ENIGMA Fuel Performance Code, Nucl.Energy 29, p.107-114 (1990)

- (13) Lassmann K., Miettinen J. and Holmstroem H., TRANSURANUS: A Fuel Rod Analysis Code Ready for Use in Simulators and Plant Analyzers, Proc. CSNI Specialist Meeting on Simulators and Plant Analyzers, Lappeenranta, Finland (1992)  
VTT-SYMP-141.572P, p.185-204 (1994)
- (14) Kinoshita M., Development of High Burnup Fuel Analysis Code EIMUS,  
CRIEPI Report No.T86004, p.1-43 (1987)
- (15) 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)
- (16) Uchida M., Macroscopic Calculational Model of Fission Gas Release from Water Reactor Fuels,  
J. Nucl. Sci. Technol., 30, p.752-761 (1993)
- (17) 内田正明、齊藤裕明、燃料棒内出力分布計算コード：RODBURN,  
JAERI-M 93-108 (1993)
- (18) Wiesenack W. and Hustadnes V., TEST-FUEL-DATA-BANK SYSTEM USER MANUAL,  
HWR-338 (1993)
- (19) Dittus F.W. and Boelter L.M.K., Univ. Calif. Pubs. Eng.2, 443 (1930)
- (20) Jens W.H. and Lottes P.A., Analysis of Heat Transfer, Burnout, Pressure Drop and Density Data for High Pressure Water, ANL-4627 (1951)
- (21) SCDAP/RELAP5/MOD2 Code Manual, Vol.4: MATPRO-A, A Library of Materials Properties for Light-Water-Reactor Accident Analysis, NUREG/CR-5273 (1990)
- (22) Gazarolli F., Garde A.M. et al., Waterside Corrosion of Zircaloy Fuel Rods,  
EPRI-NP 2789 (1982)
- (23) MATPRO-09, A Handbook of Materials Properties for Use in the Analysis of Light Water Reactor Fuel Rod Behavior, USNRC TREE NUREG-1005 (1976).
- (24) Robertson J.A.L.,  $\int k d\theta$  in Fuel Irradiation, CRFD-835 (1959)
- (25) Ross A.M. and Stoute R.L., Heat Transfer Coefficient between UO<sub>2</sub> and Zircaloy-2, CRFD-1075 (1962)
- (26) 燃料安全特別専門委員会「ジルカロイ被覆管の非弾性特性の研究」、  
(財) 原子力安全性研究協会 (1986年 2月)

- (27) Speight M.V., A Calculation on the Migration of Fission Gas in Material Exhibiting Precipitation and Re-solution of Gas Atoms under Irradiation,  
Nucl. Sci. Eng. 37, p.180 (1969)
- (28) White R.J. and Tucker M.O., A New Fission Gas Release Model,  
J. Nucl. Mater., 118 p.1-38 (1983)
- (29) Ham F.S., J. Phys. Chem. Solids 6, p.335 (1958)
- (30) Turnbull J.A., Friskney C.A., et al., The Diffusion Coefficients of Gaseous and Volatile Species during the Irradiation of Uranium Dioxide,  
J. Nucl. Mater., 107, p.168-184 (1982)
- (31) Itoh K., Iwasaki R. and Iwano Y., Finite Element Model for Analysis of Fission Gas Release from UO<sub>2</sub> Fuel, J.Nucl.Sci.Technol., 22, p.129-138 (1985)
- (32) Ainscough J.B. and Oldfield B.W., Ware J.O., Isothermal Grain Growth Kinetics in Sintered UO<sub>2</sub> Pellets, J. Nucl. Mater. 49, p.117-128 (1973/74)
- (33) Cunningham, M.E., Freshley M.D. and Lanning D.D., Development and Characteristics of the Rim Region in High Burnup UO<sub>2</sub> Fuel Pellets, J.Nucl.Mater., 188, p.19-27 (1992)
- (34) Booth A.H. and Rymen T., AECL-692 (1958)
- (35) Present R.D., Kinetic Theory of Gases, Mc-Graw Hill, N.Y. p.55 (1958)
- (36) Rashid Y.R., Tang H.R. and Johansson E.B., Mathematical Treatment of Hot Pressing of Reactor Fuel, Nucl.Eng.Des.29, p.1-6 (1974)
- (37) Washington A.B.G., Preferred Values for the Thermal Conductivity of Sintered Ceramic Fuel for Fast Reactor Use, UKAEA TRG 2236(D) (1973)
- (38) Ishimoto S., Hirai M., Ito K., Korey Y., J. Nucl. Sci. Technol., 31, p.796-802 (1994)
- (39) Wiesenack W., et al., HWR-469 (1996)
- (40) Forsberg K., Lindstrom F. and Massih A.R., Modelling of Some High Burnup Phenomena in Nuclear Fuel, IAEA Technical Committee Meeting, England, Sept. 1994
- (41) Kjaer-Pedersen N., Rim Effect Observations from the Third Riso Fission Gas Project, Fission Release and Fuel Rod Chemistry Related to Extended Burnup, IAEA -TECDOC-697 (1993)

- (42) Martin D.G., A Re-Appraisal of the Thermal Conductivity of UO<sub>2</sub> and Mixed(U,Pu) Oxide Fuels,  
J. Nucl. Mater., 110, p.73-94 (1982)
- (43) Fukushima S., Ohmichi T., Maeda A., and Watanabe H., The Effect of Gadolinium Content on the Thermal Conductivity of Near-Stoichiometric (U,Gd)O<sub>2</sub> Solid Solutions,  
ibid. 105, p.201-210 (1982)
- (44) Chubb W., Storhok V.W. and Keller D.L., Factors Affecting the Swelling of Nuclear Fuel at High Temperatures,  
Nucl. Technol. 18, p.231-255 (1973)
- (45) Kosaka Y., Thermal Conductivity Degradation Analysis of the Ultra High Burnup Experiment (IFA-562),  
HWR-341 (1993)
- (46) Rolstad E. et al., Enlarged HPG Meeting, No.1/5/HPR-188 (1074)
- (47) USNRC, WASH-1236 (1972).
- (48) Marlowe M.O., Predicting In-Reactor Densification Behavior of UO<sub>2</sub>,  
Trans. ANS 17, p.166 (1974)
- (49) MacEwan J.R., Grain Growth in Sintered Uranium Dioxide: I, Equiaxed Grain Growth,  
J. Am. Cer. Soc. 45, p.37 (1962)
- (50) Lyons M.F., Boyle R.F., Davis J.H., Hazel V.E., and Rowland T.C.,  
Nucl. Eng. Design 21, p.167 (1972)
- (51) Hagrman D.L. and Reyman G.A., MATPRO-Version11, NUREG/CR-0497 (1979)
- (52) Tachibana T., Furuya H. and Koizumi M., Dependence on Strain Rate and Temperature Shown by Yield Stress of Uranium Dioxide,  
J. Nucl. Sci. Technol., 13, p.497-502 (1976)
- (53) 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 (1954)
- (54) Pugh, Current Recommended Constitution Equations for Inelastic Analysis of FFTF Components,  
ORNL-TM-3602 (1972)
- (55) Hesketh R.V., Non-linear Growth in Zircaloy-4, J. Nucl. Mater.30, p. 217-222 (1969)

付 錄

- A1 RODBURN コードの出力ファイルの利用方法
- A2 Halden データベース TFDB の利用
- A3 入力マニュアル
- A4 プロッタ入力マニュアル
- A5 サンプル入出力の説明
- A6 サブルーチン機能リスト
- A7 サブルーチンツリー

## A1 燃焼計算コード RODBURN の出力の利用

高燃焼度燃料の解析では、燃焼に伴う核的組成の変化および出力分布の変化を考慮する必要がある。EXBURN では、出力分布（燃焼）計算コード RODBURN を前処理用コードとして用いることができる。

EXBURN に受け渡される RODBURN の計算結果の出力フォーマットを表 A.1 に示す。これらのデータは、RODBURN への入力で指定した履歴点について与えられ、RODBURN の全タイムステップについて出力される。EXBURN では、タイムステップ毎に、これらの値からタイムステップにおける燃焼度に対する線形内挿を行って、計算に用いる。

表 A.1 で示すとおり、RODBURN から、燃焼に伴って変化する径方向発熱分布、軸方向出力分布、He ガス生成モル数を得ることができる。以下に表 A.1 の各項目についての詳細を解説する。

レコード No.1、径方向発熱密度分布は、最大燃焼度となる軸方向セグメントについての、各タイムステップ毎の径方向発熱密度分布の出力である。これは、径方向発熱分布の変化は軸方向位置によらず燃焼度のみに依存すると仮定しているためである。最大燃焼度となるセグメントについての情報を出力するために、RODBURN の全タイムステップ終了時には、必要なすべての燃焼度領域に対して、燃焼度一径方向発熱密度分布のテーブルが完成される。なお、RODBURN への入力では、ペレットの半径方向が 10 等分割されるようメッシュデータを入力しなければならない。

レコード No.2、軸方向セグメント数は、RODBURN での燃料棒軸方向分割数である。

レコード No.3 は、平均燃焼度と、軸方向セグメント毎の He 生成量を与える。

レコード No.4、No.5 は、EXBURN 入力データの履歴データを修正するために用いられる。

レコード No.4 は平均燃焼度と平均線出力および平均高速中性子束を与える。

レコード No.5 は、各軸方向セグメント毎の線出力および高速中性子束を求めるために、平均線出力に対する軸方向相対出力比を与える。

レコード No.6 は RODBURN で用いた各軸方向セグメントの軸方向座標である。

次に、各データの EXBURN での利用法を以下に述べる。なお、RODBURN からのデータを EXBURN で用いるためには、EXBURN への線出力入力データとして燃料棒平均線出力が入力されなければならない。この平均線出力の時間履歴から、EXBURN の各入力履歴点での平均燃焼度が求められる。

径方向発熱密度分布は、レコード No.1 のデータ群から作成された燃焼度一径方向発熱密度分布のテーブル上のデータを、各軸方向セグメントにおける燃焼度に対応するように内挿補間して求められる。

ペレット径方向燃焼度分布は、径方向発熱密度分布を用いて求められる。径方向発熱密度は径

方向各要素の平均値を 1.0 とした比率で与えられる。したがって、径方向  $i$  番目の要素の径方向発熱密度比を  $R_i$  とすれば、この要素の燃焼度増分  $\Delta Bu_i$  は、セグメント毎の各タイムステップの燃焼度増分  $\Delta Bu$  に対し  $\Delta Bu_i = R_i \Delta Bu$  で与えられる。各要素の燃焼度は、この燃焼度増分  $\Delta Bu_i$  の時間的積算により求められる。

He ガス生成モル数は、レコード No.3 のデータ群により各軸方向セグメント毎に作成された、平均燃焼度 - He ガス生成モル数のテーブルを平均燃焼度で内挿補間して求められる。

EXBURN への入力で指定した履歴データのうち、平均高速中性子束と軸方向相対出力比に関しては、レコード No.4、No.5 のデータにより修正がなされる。平均高速中性子束と軸方向相対出力比は、レコード No.4 および No.5 のデータ群よりつくられた軸方向セグメント毎の平均燃焼度 - 平均高速中性子束テーブルおよび平均燃焼度 - 軸方向相対出力比テーブルを、平均燃焼度に対してそれぞれ内挿補間して求められる。

ところで、RODBURN からのデータと EXBURN への入力データとでは、同じ平均燃焼度に対する平均線出力が異なる場合がある。このため、平均高速中性子束に関しては、さらに、RODBURN からの平均線出力と EXBURN に入力した平均線出力との差異の分を、

$$\phi_{EXB} = \frac{P_{EXB}}{P_{ROD}} \phi_{ROD}$$

により補正して EXBURN で用いる。ここで、

$\phi_{EXB}$  : EXBURN で用いる平均高速中性子束

$\phi_{ROD}$  : RODBURN による平均高速中性子束

$P_{EXB}$  : EXBURN コードで入力した平均線出力

$P_{ROD}$  : RODBURN コードによる平均線出力

である。

また軸方向座標についても、RODBURN での軸方向セグメント分割と、EXBURN の軸方向セグメント分割が異なる、あるいは異なる場合にも対処できるように、EXBURN 内に軸方向についての再メッシュ切り機能を持たせた。すなわち、RODBURN での第  $i$  セグメントでのあるデータ値を  $\phi_i$ 、第  $i+1$  セグメントでの値を  $\phi_{i+1}$  とし、EXBURN での第  $j$  セグメントでのデータ値を  $\phi'_j$  とすれば、

軸方向出力分布に関しては、

$$\phi'_j = \frac{(Z_i - Z'_{j-1})\phi_i + (Z'_j - Z_i)\phi_{i+1}}{(Z'_j - Z'_{j-1})}$$

He ガス生成モル数に関しては、

$$\phi'_j = \frac{(Z_i - Z'_{j-1})}{(Z_i - Z_{i-1})}\phi_i + \frac{(Z'_j - Z_i)}{(Z_{i+1} - Z_i)}\phi_{i+1}$$

として求めることとする。ここで、 $Z_i$ 、 $Z_j$ はそれぞれ、レコード No.6 で与えられた RODBURN での軸方向座標、および EXBURN での軸方向座標である。

なお、燃焼度の伸長および軸方向座標補間による誤差の累積をさけるために、求められた値について補正処理を行っている。

表 A.1 RODBURN コードの出力フォーマット

| レコード<br>No. | データ<br>No. | データ項目     | 単位                 | フォーマ<br>ット | カラム    | 備考                 |
|-------------|------------|-----------|--------------------|------------|--------|--------------------|
| 1           | 1          | 最大燃焼度     | MWd/t-U            | F10.2      | 1~10   | *1)参照              |
|             | 2~11       | 径方向発熱密度分布 |                    | 10F6.3     | 11~70  |                    |
| 2           | 1          | 軸方向セグメント数 |                    | I5         | 1~5    |                    |
| 3           | 1          | 平均燃焼度     | MWd/t-U            | F10.2      | 1~10   | *1)参照              |
|             | 2~13       | He ガスモル数  | モル                 | 12E12.4    | 11~154 | 軸方向セグメント数          |
| 4           | 1          | 平均燃焼度     | MWd/t-U            | F10.2      | 1~10   | *1)参照              |
|             | 2          | 平均線出力     | W/cm               | E12.4      | 11~22  |                    |
|             | 3          | 高速中性子束    | $n/cm^2 \cdot sec$ | E12.4      | 23~34  |                    |
| 5           | 1~12       | 軸方向相対出力分布 |                    | 12F6.3     | 1~72   | 軸方向セグメント数          |
| 6           | 1~12       | 軸方向座標     | cm                 | 12E12.4    | 1~144  | 軸方向セグメント数<br>*2)参照 |

\*1) 軸方向セグメントに対する燃焼度

\*2) 第 $n$ セグメントと第 $n+1$ セグメントの境界座標

## A2 Halden データベースの利用

ハルデンプロジェクトでは、HBWR における実験データをコンピュータで利用できるよう、1985 年より TEST-FUEL-DATA-BANK(TFDB) SYSTEM を構築し、データの提供を行っている。

そこで、TFDB データから EXBURN 入力データのうち照射履歴部分を作成するユーティリティープログラム TF2EX を作成した。TF2EX の主な機能は以下のとおりである。

- 数万レコードにおよぶ TFDB のデータファイルより照射履歴の特徴を代表する数百ステップ程度のレコードを抽出する作業を援助する。
- 事前に準備した EXBURN コントロールデータ、形状データ、のファイルと抽出した履歴データを結合し、EXBURN 入力ファイルを作成する。
- EXBURN の計算結果と実験データを比較するためのファイルを TFDB データファイルから作成する。

使用の詳細については TF2EX ユーザーズマニュアルを参照のこと。

## A3 入力マニュアル

| Card No. | SYMBOL   | (FORMAT)              |
|----------|--|-----------------------|
| 1        | MTITLE(I), I=1, 20   | (20A4) 任意のタイトル        |
| 2        | ¥INPUT ¥END<br>計算パラメータを Name List にて指定する。  | (2~80 カラム) 任意のパラメータ   |
| 3        | NAX, IFEM, IPLANT<br>NAX = 軸方向セグメント数(1≤NAX≤12)<br>IFEM = 着目セグメント番号(1≤IFEM≤NAX)<br>IPLANT = 1 …… Halden BWR の場合<br>= 2 …… その他の BWR の場合<br>= 3 …… PWR の場合  | (3I10) 燃料棒仕様          |
| 4        | MRASA, CDIN, CDOU<br>MRASA = 0 …… RA 材<br>= 1 …… SR 材<br>CDIN = 被覆管内径 (cm)<br>CDOU = 被覆管外径 (cm)  | (I10, 2F10.0) 被覆管仕様   |
| 5        | NAX 枚必要 (I = 1, NAX)<br>IDISH(I), ICHAM(I), PDIN(I), PDIA(I),<br>PLENG(I), ENR(I), FDENI(I), DZ(I)<br>(2I10, 6F10.0)<br>[注 : ペレットの半径方向メッシュ数は 10 に固定である]<br>IDISH(I)=0 …… ディッシュなしペレット<br>= 1 …… 片端面ディッシュペレット<br>= 2 …… 両端面ディッシュペレット<br>ICHAM(I)=0 …… チャンファなしペレット<br>= 1 …… チャンファ付きペレット<br>PDIN (I) = ペレット中心孔直径 (cm)<br>PDIA (I) = ペレット直径 (cm)<br>PLENG(I) = 1 ペレット長さ (cm)<br>ENR (I) = U-235 濃縮度 (-)<br>FDENI(I) = ペレット密度対理論密度比 (-)<br>DZ (I) = ペレットスタック部セグメントの軸方向長さ (cm) | (2I10, 6F10.0) ペレット仕様 |
| 6        | IDISH = 1 or 2 の場合のみ入力<br>DISH, DEPTH, DISHB (3F10.0)<br>DISH = ディッシュ直径(cm)<br>DEPTH = ディッシュ深さ(cm)<br>DISHB = ディッシュ底直径(cm)   | ディッシュ仕様               |
| 7        | ICHAM = 1 の場合のみ入力<br>CHAMR, CHAMZ (2F10.0)<br>CHAMR = チャンファ幅 (cm)<br>CHAMZ = チャンファ深さ(cm)   | チャンファ仕様               |
| 8        | PLENUM(2), GPIN, (GMIXO(I), I=1,4),<br>PWEIT, PLENUM(1) (8F10.0)<br>PLENUM(2) = 上部 プレナム部容積 (cm <sup>3</sup> )<br>GPIN = 初期ガス圧力 (MPa)<br>GMIXO(I) = 初期ガス組成 (-)<br>i = 1 … He, i = 2 … N <sub>2</sub> , i = 3 … Kr, i = 4 … Xe<br>* N <sub>2</sub> については Ar 等のガスに変更可能 (Namelist にて指定)<br>PWEIT = ペレット総重量 (gram)<br>PLENUM(1) = 下部 プレナム容積 (cm <sup>3</sup> )  | プレナム仕様                |

| Card No. | SYMBOL   | (FORMAT)          |   |
|----------|--|-------------------|---|
| 9        | NHIST  | (I10)             | 履歴点数<br>NHIST > 1 を入力<br>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<br>A1 = 時間 (Hour)<br>B1 = 燃焼度 MWd/tUO <sub>2</sub> (IBUNP = 0)<br>MWd/tU (IBUNP = 1)<br>GJ/kgU (IBUNP = 2)<br>A2 = 線出力 (W/cm)<br>A5 = 高速中性子束 (n/cm <sup>2</sup> s)<br>A3 = 冷却材の入口温度 (K)<br>A4 = 冷却材の圧力 (MPa) |
|          | IT = 0 時間または燃焼度 ; IT=-100としたタイムステップからの増分量<br>(ただし、IT=-100 の指定がない場合は最初からの経過時間または燃焼度)<br>= -100 前タイムステップからの時間増分 (または燃焼度増分)<br>= 100 IT=-100 の指定を解除する。<br>(最初からの経過時間または燃焼度となる)                                |                   |   |
|          | IP = 0 出力しない履歴点<br>= 1 出力する履歴点   |                   |   |
|          | IS = 0 定常計算<br>= 1 ガス拡散計算を省略 (瞬時混合)<br>= 2 ガス拡散計算を行い、制限 $\Delta t_2$ を与える。   |                   |   |
|          | A6 = 冷却材速度 (m/s) (ICLMAS=0)<br>冷却材質量流量 (kg/cm <sup>2</sup> s) (ICLMAS=1)<br>ただし、A1 (時間)、B1 (燃焼度) はどちらか一方を指定する。<br>両方指定すると B1 (燃焼度) の入力は無視される。<br>また、IS は通常は、IAUTO=1 であれば入力する必要はなく、<br>コード中で IS=1 に自動設定される。 |                   |   |
| 11       | (RH(I), I=1, 12), II   | (12F5.0, I5)      | 軸方向相対出力分布<br>RH(I)=軸方向セグメント j の相対出力比 (-)<br>(NAX 個のデータ)<br>II = 同様の相対出力比を入力する履歴点数<br>なお、II を 2 以上で指定した場合には、それ以降の II-1 タイム<br>ステップ分の入力についてはカード 11 は省略する。   |
| 12       | BU, (RRH(I), I=1, 10)  | (F10.0, 10F5.0)   | 径方向相対出力分布<br><u>IFLX&gt;0 の場合のみ入力</u><br>BU = 燃焼度 (単位は 10 と同じ)<br>RRH(I)=径方向リング要素 I の相対出力比 (-)<br>NAMELIST で入力した IFLX の数だけ入力  |
| 13       | IEND   | (A4)              | 入力終了カード<br>“STOP” を入力する   |

## NAMELIST で指定する変数 1

| 変数名       | 内 容   | 標準値     |
|-----------|---|---------|
| 入力オプション   |   |         |
| IBUNP     | 入力燃焼度の単位指定 (=0:MWd/tUO <sub>2</sub> , =1:MWd/tU, =2:GJ/kgU)   | 0       |
| IDAY      | 入力時間の単位指定(=0:hr、=1:day)   | 0       |
| IFLX      | 軸方向及び径方向出力分布を入力する燃焼度履歴点数。<br>(=0 : Robertson モデル、<0: RODBURN より入力)<br>(>=0 の場合、径方向の燃焼度分布は、燃焼度依存性のある物性値には反映しない。LBU 参照)   | 0       |
| IRH       | 軸方向出力分布の補間オプション<br>(=0: 省略した入力点は前段と同じ<br>=1: 省略した入力点間は燃焼度による線形補間)   | 0       |
| PWCHG     | 入力した線出力を(1+PWCHG)倍して計算する  | 0.0     |
| FAIW      | JW/cm 当りの高速中性子束(n/cm <sup>2</sup> -s/W/cm)<br>(履歴データで高速中性子束データを省略できる。)  | 0.0     |
| ICLMAS    | 冷却材入口流量のオプション<br>(=0:流量を流速(m/s)で与える。=1:流量を質量流量(kg/cm <sup>2</sup> s)で与える)   | 0       |
| 計算オプション   |   |         |
| INPCK     | 入力チェックオプション(=0: 通常計算, =1: 入力チェック)   | 0       |
| ICK1      | 温度計算オプション (=0: 通常計算, =1: 温度計算)  | 0       |
| ICHI      | 熱計算における弾性計算オプション (=0: 通常計算, =1: 弾性計算)   | 0       |
| MPP       | FP 放出計算オプション (=0: 通常計算,<br>=1: 軸方向出力分布が同じ点は計算しない)   | 0       |
| TLIM      | CPU 時間の打ち切り制御<br>(実行時間が TLIM (s)になると計算が打ち切られる)  | 20000.0 |
| タイムステップ制御 |   |         |
| IAUTO     | タイムステップ制御オプション<br>IAUTO=0: 各履歴入力点に対して IS の値の入力が有効、<br>IAUTO=1: すべての履歴入力点に対して自動的に IS=1 の設定となる。   | 1       |
| DPXX      | 1 タイムステップ当りの出力増分幅 (W/cm)  | 10.0    |
| DPBU      | 1 タイムステップ当りの燃焼度増分幅 (MWd/tUO <sub>2</sub> )  | 500     |
| IPH       | DPXX, DPBU の制御を指定セグメント(IFEM)とする場合は IPH=0,<br>最大出力セグメントとする場合は IPH=1  | 0       |
| EFCOEF    | クリープによるタイムステップ幅決定因子<br>$\Delta t = \frac{\bar{\sigma}}{E \cdot \dot{\varepsilon}_c} \cdot EFCOEF$<br>$\bar{\sigma}$ : 相当応力, $E$ : ヤング率, $\dot{\varepsilon}_c$ : 相当クリープひずみ速度 | 1.0     |
| LCMAX     | ペレット・被覆管接触状態の固着／すべり判定の最大回数  | 3       |
| LMAX      | 変形計算における Newton-Raphson 法の繰り返し回数  | 2       |
| ITIMY     | 弾塑性判定タイムステップコントロールオプション<br>(=-1: タイムステップコントロールなし、=0: 除荷のみタイムステップコントロールする<br>=1: タイムステップコントロール有)   | -1      |

## NAMELIST で指定する変数 2

| 変数名        | 内 容  | 標準値                      |
|------------|--|--------------------------|
| 計算条件       |  |                          |
| ITIME(3)   | プレナムガス圧、体積ガス組成を変更するオプション。<br>ITIME(I)に変更する履歴点番号を入力する。(最大3カ所まで)   | 3*0                      |
| GASPRN(3)  | ITIME(I)の履歴点でのプレナムガス圧(MPa)を GASPRN(I)で指定する   | 3*0.0                    |
| PLENM(3)   | ITIME(I)の履歴点でのプレナム体積(cm <sup>3</sup> )を PLENM(I)で指定する<br>(* 燃料棒内体積ではなくプレナム部の体積であることに注意)  | 3*0.0                    |
| GMIXN(4,3) | ITIME(I)の履歴点でのガス組成(4成分)のモル比(-)を<br>GMIXN(1,I)～GMIXN(4,J)で指定する  | 12*0.0                   |
| TROOM      | 燃料棒各要素の初期温度(K)   | 293.15                   |
| XKSU       | 上部プレナムバネ定数(N/m)  | 1500.0                   |
| ALSU       | 上部プレナムバネ熱膨張率(1/K)  | 1.5 × 10 <sup>-5</sup>   |
| XKSL       | 下部プレナムバネ定数(N/m)  | 2500.0                   |
| ALSL       | 下部プレナムバネ熱膨張率(1/K)  | 1.5 × 10 <sup>-5</sup>   |
| 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)   | 0.0                      |
| FAREA      | 冷却材流路断面積(cm <sup>2</sup> )   | 0.0                      |
| PITCH      | 燃料棒間のピッチ(cm)   | 1.3                      |
| NRCZR      | 被覆管健全性メッシュ分割数(変形モデル)   | 2                        |
| NRCOX      | 被覆管酸化膜メッシュ分割数(変形モデル)   | 2                        |
| ATHEX      | 被覆管軸方向熱膨張係数(°C <sup>-1</sup> ) (ICATHX=0の場合に使用する)  | 4.441 × 10 <sup>-6</sup> |
| RTHEX      | 被覆管径方向熱膨張係数(°C <sup>-1</sup> ) (ICATHX=0の場合に使用する)  | 6.721 × 10 <sup>-6</sup> |
| EFAC       | ペレットヤング率に対する倍率   | 1.0                      |
| 熱伝導度オプション  |  |                          |
| IPTHCN     | ペレット熱伝導度の物性式オプション<br>=1: MATPRO-09, =2: Washington, =3: Hirai, =4: Halden,<br>=5: modified Hirai, =6: Forsberg, =7: Kjaer-Pedersen | 1                        |
| MOX        | MOX=1 とすると Martin の MOX 燃料用熱伝導度式を用いる。  | 0                        |
| PU         | PuO <sub>2</sub> 重量分率(wt. frac.)   | 0.0                      |
| Y          | MO <sub>2-y</sub> のyの値   | 0.0                      |
| IGD        | IGD=1 とすると Fukushima のガドリニア入り熱伝導式を用いる。   | 0                        |
| GD         | Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 濃度(wt. frac.)   | 0.0                      |
| 熱膨張オプション   |  |                          |
| IPTHEX     | ペレット熱膨張の物性式オプション<br>=0 または=1: MATPRO-09, =2: Burdick, =3: Halden, =4: Conway   | 0                        |
| ICATHX     | 被覆管熱膨張の物性式オプション =0: MATPRO-09, =1: Scott   | 0                        |
| DTPL       | プレナム温度と冷却材温度との温度差(°K)  | 25.0                     |

## NAMELIST で指定する変数 3

| 変数名                   | 内 容   | 標準値                |
|-----------------------|---|--------------------|
| ペレットクラック・リロケーションオプション |   |                    |
| XRELOC                | リロケーションパラメータ (熱モデル)   | 0.2                |
| FRELOC                | リロケーションパラメータ (変形モデル)  | 0.5                |
| EPSRLZ                | 軸方向リロケーションひずみ (変形モデル)   | 0.003              |
| FACR                  | 径方向にリロケーションひずみの FACR 倍だけ埋まるとペレットは剛性を回復する (変形モデル)  | 1.0                |
| FACZ                  | 軸方向リロケーションひずみの FACZ 倍だけ埋まるとペレットは剛性を回復する (変形モデル)   | 1.0                |
| BUMIN                 | ペレットリロケーションひずみが径方向から周方向へ移動を開始する燃焼度(MWd/tU) (熱モデル)   | 0.0                |
| BUMAX                 | ペレットリロケーションひずみの径方向から周方向への移動が完了する燃焼度(MWd/tU) (熱モデル)  | 0.0                |
| IURS                  | 熱モデル中のペレット剛性回復モデルにおけるオプション。<br>IURS=0: $\varepsilon_R$ =リロケーションひずみ、<br>IURS=1: $\varepsilon_R$ =リロケーション $\varepsilon$ + ガスバブルスウェーリング $\varepsilon$ + クリープ $\varepsilon$ | 0                  |
| IYNG                  | ペレットクラックモデルオプション<br>(=0: 刚性回復が 2 次関数、=1: 刚性回復が 1 次関数) (変形モデル)   | 1                  |
| ECRAC3                | 完全クラック時のペレット剛性 (Pa) (変形モデル)   | $2 \times 10^9$    |
| ペレット焼きしまりオプション        |   |                    |
| IDENSF                | ペレット焼きしまり物性式オプション =0:FEMAXI-III , =1:Rolstad , =2:NRC , =3:Marlowe (熱処理による密度変化) , =4:Halden   | 0                  |
| DMAX                  | (IDENSF=0,2,3 の場合に使用する)<br>焼きしまりによる最大体積収縮割合(%)  | 1.0                |
| SBU                   | (IDENSF=0 の場合に使用する)<br>焼きしまりの 90% 完了燃焼度 (MWd/tUO <sub>2</sub> )   | 2500               |
| TDNSF                 | (IDENSF=1,3 の場合に使用する) 焼結温度 (°K)   | 2000               |
| GG                    | (IDENSF=3 の場合に使用する) 热処理後の結晶粒径 (m)   | $10^{-5}$          |
| GG0                   | (IDENSF=3 の場合に使用する) 初期結晶粒径 (m)  | $8 \times 10^{-6}$ |
| SITIM                 | (IDENSF=3 の場合に使用する) 热処理時間 (hr)  | 24.0               |
| ADST                  | IDENSF=4 の場合の焼きしまり調整ファクター   | 0.6                |
| ペレットスウェーリングオプション      |   |                    |
| IFSWEL                | ペレットスウェーリング物性式オプション<br>=0: Chubb , =1: Speight , =2: MATPRO-09  | 0                  |
| STFCP                 | (IFSWEL=0 の場合に使用する)<br>ガスバブルスウェーリングが発生できなくなる接触圧力(Pa)<br>(変形モデル)   | $-3 \times 10^7$   |
| SPCON                 | (IFSWEL=0 の場合に使用する)<br>ガスバブルスウェーリングが発生できなくなる接触圧力(Pa)<br>(熱モデル)  | $-10^6$            |
| FACP                  | (IFSWEL=1 の場合に使用する)<br>バブル外圧中の接触圧力にかかるファクター   | 1.0                |
| BG                    | (IFSWEL=1 の場合に使用する)<br>ペレット粒界の 1 バブルあたりの F P 原子数 (atoms/bubble)   | $5 \times 10^8$    |

## NAMELIST で指定する変数 4

| 変数名                  | 内 容   | 標準値                  |
|----------------------|---|----------------------|
| ペレット物性の燃焼度依存オプション    |   |                      |
| LBU                  | ペレット物性値の経験式で、燃焼度依存項のあるものに対して、燃焼度を指定する。<br>LBU=0:半径方向の平均燃焼度で物性値を計算する。<br>LBU=1:半径方向のリング要素ごとに、燃焼度（RODBURN による半径方向分布の計算結果）を指定して物性値を計算する。 | 0                    |
| クリープオプション            |   |                      |
| FCRFAC               | ペレットクリープひずみ速度に対する倍率（変形モデル）  | 10.0                 |
| CRPEQ                | 被覆管クリープ速度式のオプション<br>=0: MATPRO-09, =1: 燃安専の式 (Zry-4)  | 0                    |
| TFCRFC               | ペレットクリープひずみ速度に対する倍率（熱モデル）   | 1.0                  |
| TCS                  | ペレットクリープ計算での温度のカットオフ値（変形モデル）(°K)  | 2073.15              |
| TCRMX                | ペレットクリープ計算での温度のカットオフ値（熱モデル）(°K)   | 1773.15              |
| CRFAC                | 被覆管クリープひずみ速度に対する倍率（変形モデル）   | 1.0(RA材)<br>1.3(SR材) |
| TCCRFC               | 被覆管クリープひずみ速度に対する倍率（熱モデル）  | 1.0                  |
| FAIMAX               | 被覆管クリープひずみ速度の計算に用いる高速中性子束の上限値 (n/cm <sup>2</sup> s)   | 10 <sup>14</sup>     |
| IPUGH                | 被覆管クリープ計算で Pugh の反転を考慮する場合は、IPUGH=1。  | 0                    |
| ペレットホットプレスパラメータオプション |   |                      |
| BETAX                | ペレットホットプレスパラメータ $\alpha$  | 0.002                |
| IHOT                 | IHOT=0:ホットプレスパラメータ $\alpha$ は入力指定した BETAX で一定。<br>IHOT=1:ポロシティに比例して変化する。初期値は BETAX。   | 1                    |
| 塑性モデルオプション           |   |                      |
| IFY                  | ペレット塑性モデルオプション<br>=0: Rodford, =1: Tachibana  | 1                    |
| ISTR                 | ジルカロイの降伏曲面の大きさ K を ISTR ≠ 0 の場合には、<br>$K = \sigma_y + 33.44 \left( \frac{kg}{mm^2} \right)$ とする。                                      | 0                    |
| 照射成長オプション            |   |                      |
| ICAGRW               | 被覆管照射成長式のオプション<br>=0: 考慮しない、=1: MATPRO-09, =2: Manzel<br>=3: Hannerz, =4: Hesketh   | 1                    |
| CATEXF               | (ICAGRW=1 の場合に用いる) 軸方向ファクター $f_z$   | 0.05                 |
| COLDW                | (ICAGRW=1 の場合に用いる) コールドワーク $C_w$  | 0.81                 |
| 異方性パラメータオプション        |   |                      |
| H0(2)                | 被覆管異方性パラメータ H0  | 1.0                  |
| F0(2)                | 被覆管異方性パラメータ F0  | 1.0                  |
| G0(2)                | 被覆管異方性パラメータ G0  | 1.0                  |

## NAMELIST で指定する変数 5

| 変数名        | 内 容  | 標準値                |
|------------|--|--------------------|
| FP ガス放出モデル |  |                    |
| IGASP      | FP ガス放出率モデルオプション<br>=0: 機構論的モデル, =1: 温度領域モデル, =2: 燃焼度依存モデル   | 0                  |
| IRIM       | (IGASP=0 の場合に使用する) リムによる FP ガス放出オプション<br>=1: Battelle, =2: Cunningham,   | 1                  |
| IGAS       | (IGASP=1 の場合に使用する) 温度領域モデルオプション<br>=1: Nelson, =2: Morishima, =3: Lewis =4: Karsten  | 0                  |
| APORE      | (IGASP=0 の場合に使用する) 初期粒内バブル半径 (cm)  | 0.0                |
| BFCT       | (IGASP=0 の場合に使用する)<br>粒内バブルからマトリックスへの再溶解率 b を BFCT 倍する。  | 1.0                |
| FACD       | (IGASP=0 の場合に使用する)<br>粒内での実効拡散係数を FACD 倍する。  | 1.0                |
| ADDF       | (IGASP=0 の場合に使用する)<br>粒界から粒内への再溶解率を ADDF 倍する   | 9.0                |
| FBSAT      | (IGASP=0 の場合に使用する) 粒界でのガス飽和量を FPSAT 倍する  | 1.0                |
| PSAT       | (IGASP=0 の場合に使用する)<br>粒界バブルにかかる圧力の限界値 (Pa)   | $10^8$             |
| IPEXT      | (IGASP=0 の場合に使用する)<br>粒界バブルにかかる圧力 Pext についてのオプション<br>=0: Pext=0, =1: Pext=プレナム圧力 =2: Pext=接触圧力,<br>=3: Pext=Max(プレナム圧, 接触圧), =10: Pext=熱応力,<br>=11: Pext=熱応力 (プレナム圧力を考慮),<br>=12: Pext=熱応力 (接触圧力を考慮),<br>=13: Pext=熱応力 (プレナム圧力+接触圧力を考慮),<br>=14: Pext=力学解析 (応力計算) で求めた平均応力<br>(注: 熱応力は、簡易な線形熱膨張モデルで計算したもの) | 1                  |
| OPORO      | (IGASP=0 の場合に使用する) ペレット結晶粒界での開気孔割合   | 0.0                |
| ALHOT      | (IPEXT=10,11,12,13 の場合に使用する)<br>粒界気泡にかかる平均応力に対するホットプレスパラメータ  | 0.0001             |
| APEXT      | (IPEXT=14 の場合に使用する)<br>Pext を力学解析 (応力計算) で求めた平均応力の APEXT 倍とする。   | 1.0                |
| FGG        | (IGASP=0 の場合に使用する) 粒成長掃き出し率を FGG 倍する。  | 1.0                |
| RFGFAC     | (IGASP=0 の場合に使用する) リム効果を考慮するときは RFGFAC ≠ 0 とする。リムによる FP ガス放出率は RFGFAC 倍となる。  | 0.0                |
| FRMIN      | (IGASP=0 の場合に使用する) FP ガス放出率の最小放出率 (%)  | 0.5                |
| THEATF     | (IGASP=0 の場合に使用する)<br>粒内拡散方程式に用いる補間パラメータ θ   | 1.0                |
| FMULT      | (IGASP=0 の場合に使用する)<br>FP ガス放出モデルのタイムステップ幅の調整因子   | 1.0                |
| NODEG      | (IGASP=0 の場合に使用する)<br>FP ガス放出モデル用の粒内メッシュ数(5 以下)  | 3                  |
| RREL       | (IGASP=0 の場合に使用する)<br>FP ガス放出モデル用の粒内メッシュの分割比(NODEG-1 個指定する)  | 10,1               |
| RB         | (IGASP=0 の場合に使用する)<br>境界層幅 (再溶解用メッシュ)(cm)  | $2 \times 10^{-6}$ |

## NAMELIST で指定する変数 6

| 変数名                           | 内 容  | 標準値                  |
|-------------------------------|--|----------------------|
| <b>UO<sub>2</sub>粒成長オプション</b> |  |                      |
| IGRAIN                        | UO <sub>2</sub> 粒成長の物性式のオプション<br>=0: Itoh , =1: Ainscough , =2: MacEwan ,<br>=3: Lyons , =4: MATPRO-09 | 0                    |
| GR                            | 初期ペレット粒径 (μm)  | 10.0                 |
| GRWF                          | (IGRAIN=0 の場合に用いる) 粒成長速度を GRWF 倍する   | 1.5                  |
| AG                            | (IGRAIN=0 の場合に用いる)<br>フィッティングパラメータ(粒成長抑制項)   | 1.0                  |
| <b>He 放出オプション</b>             |  |                      |
| FACHE                         | RODBURN の He 生成量計算値を FACHE 倍して用いる。   | 1.0                  |
| HERLS                         | He ガス放出量の、FP ガスの放出量に対する倍率  | 3.0                  |
| NTVHE                         | TVHE の指定した時刻点数   | 0                    |
| TVHE<br>(13,50)               | TVHE(1,n) : n 番目の時刻点数(hr)<br>TVHE(i+1,n) : n 番目の時刻での i セグメントの He 生成量(mole)                             | 650*0.               |
| <b>ガス流動モデルオプション</b>           |  |                      |
| IST                           | ガス流動オプション<br>=0: 瞬時完全混合モデル, =1: 軸方向ガス拡散モデル   | 1                    |
| GMIN                          | ペレット・被覆管ギャップのガス流動モデル用の最小ギャップ幅<br>(cm)  | 0.001                |
| THG1                          | 軸方向 FP ガス流動モデルで用いる温度等に対する補間パラメータ θ <sub>1</sub>  | 1.0                  |
| THG2                          | 軸方向 FP ガス流動モデルでの拡散計算で用いる補間パラメータ θ <sub>2</sub>   | 1.0                  |
| AMLMX2                        | セグメント間の移行ガスのモル数の上限値 (mol)  | 10 <sup>-6</sup>     |
| AMLMX3                        | セグメント毎の FP ガス放出量の上限値 (mol)   | 2 × 10 <sup>-6</sup> |
| DTPR                          | 1 タイムステップ当たりの FP ガス放出量のプレナムガス量に対する許容割合   | 0.01                 |
| ETA                           | 制御パラメータ(タイムステップ幅の決定に用いる)   | 0.05                 |
| <b>被覆管腐食オプション</b>             |  |                      |
| ICORRO                        | 被覆管外面腐食モデルオプション<br>=0: 考慮しない, =1: EPRI モデル<br>=2: MATPRO-A(PWR), =3: MATPRO-A(BWR)                     | 0                    |
| FCORRO                        | 酸化膜成長速度加速因子  | 0.0                  |
| PBR                           | 酸化による体積増加率 (-) ; Piling-Bedworth Ratio   | 1.4                  |
| OXFAC                         | 酸化膜熱伝導度にかかるファクター   | 1.0                  |
| OXTH(I)                       | 各セグメント毎の外表面の初期酸化膜厚み(μm)  | 12 * 0.1             |
| CNOX                          | 酸化膜熱伝導式に酸化膜の厚みの効果を入れる。<br>ファクター ( $\mu\text{m}^{-1}$ ) $f = 1 - CNOX \cdot S$ で与える。S は酸化膜厚 (μm)        | 0.0                  |
| OXTHMX                        | 酸化膜厚みの上限値 (μm)   | 200.0                |
| <b>被覆管表面熱伝達モデルオプション</b>       |  |                      |
| AKFAC                         | 被覆管表面熱伝達係数を AKFAC 倍する。   | 1.0                  |
| ISCNHAL                       | ISCNHAL=1:被覆管表面温熱伝達係数に Halden の実験式を用いる   | 0                    |
| CSTEM                         | 被覆管表面温度を指定する場合は CSTEM を用いる。CSTEM>0 の場合には CSTEM=被覆管表面温度 (K) となる。  | 0.0                  |

## NAMELIST で指定する変数 7

| 変数名                | 内 容  | 標準値  |
|--------------------|--|--|
| ギャップコンダクタンスオプション   |  |  |
| IGAPCN             | ギャップコンダクタンスモデルオプション =0 : Modified Loss & Stoute, =1 : MATPRO-09, =2 : Loss & Stoute, =3 : modified Dean  | 0  |
| R1                 | (IGAPCN=0, 2 の場合に用いる) ペレット表面の粗さ ( $\mu\text{m}$ )  | 1.0  |
| IAR                | ガス組成の第 2 成分を標準の $\text{N}_2$ から変更するオプション。 Ar を用いる場合は IAR='AR'を指定する。'AR'を指定すると GG2, AA2, BB2, WW2 等の物性値は自動的に変更設定される。Ar 以外のガスに変更する場合にはこれらの物性値を入力しなければならない。   | 'N2'   |
| GG2                | 固相気相間温度ジャンプ距離(cm)。 IAR で $\text{N}_2$ 以外のガスを指定したときに用いられる。標準値は Ar に対する値である。   | $5 \times 10^{-4}$   |
| AA2                | ガスの熱伝導度 K を $K=aT^b(\text{W}/\text{m}\cdot\text{K})$ で与える際の係数 a の値。<br>IAR で $\text{N}_2$ 以外のガスを指定したときに用いられる。標準値は Ar に対する値である。   | $3.421 \times 10^{-6}$   |
| BB2                | 同じく $K=aT^b(\text{W}/\text{m}\cdot\text{K})$ における係数 b の値。 IAR で $\text{N}_2$ 以外のガスを指定したときに用いられる。標準値は Ar に対する値である。  | 0.701  |
| WW2                | ガスのモル質量。 IAR で $\text{N}_2$ 以外のガスを指定したときに用いられる。標準値は Ar に対する値である。   | 39.948   |
| アウトプット及びプロッターオプション |  |  |
| IPHIS              | サマリー出力オプション。履歴データ中で出力オプション IP=1 とした履歴点については詳細出力がされる。これとは別に出力の最後に、データ項目毎の時間変化のサマリーが出力される。<br>IPHIS=0 : IP=1 で指定した履歴点のみサマリーに出力する<br>IPHIS=1 : IP によらず全ての履歴点のデータをサマリーに出力する  | 1  |
| IPRINT             | 出力オプション(=0:出力しない、=1:出力する)<br>(1) インプットデータリスト<br>(2) 燃料設計データ<br>(3) 座標・メッシュ切りデータ<br>(4) パラメータリスト<br>(5) 履歴データ<br>(6) タイムステップごとの熱的結果<br>(7) タイムステップごとの力学的結果<br>(8) セグメントごとの熱的結果のまとめ (熱モデル)<br>(9) セグメントごとの力学的結果のまとめ (熱モデル)<br>(10) セグメントごとの FP ガスの結果のまとめ (熱モデル)<br>(11) 燃料棒全体の FP ガスの結果のまとめ (熱モデル)<br>(12) セグメントごとのペレット・被覆管の変形挙動のまとめ (力学的モデル)<br>(13) セグメントごとのペレットの応力とひずみのまとめ (力学的モデル)<br>(14) 被覆管の応力とひずみのまとめ(力学的モデル)<br>(15) 主要結果のまとめ (Final Information)<br>(16) セグメントごとの熱的挙動のプロッター (ON-LINE) (Unit 14)<br>(17) セグメントごとの FP ガス挙動のプロッター (ON-LINE) (Unit 14)<br>(18) 力学的挙動のプロッター (ON-LINE) (Unit 14)<br>(19) 燃料棒全体のひずみ、および着目セグメントの腐食のまとめ<br>(20) 未使用 | 1<br>1<br>1<br>1<br>1<br>1<br>1<br>1<br>1<br>1<br>1<br>1<br>1<br>1<br>1<br>1<br>1<br>1<br>0<br>0 |

## NAMELIST で指定する変数 8

| 変数名    | 内 容  | 標準値  |
|--------|--|------|
| IWNOD  | セグメント出力オプション (=0:出力しない,=1:出力する)<br>IPRINT(8), IPRINT(9), IPRINT(10), IPRINT(16), IPRINT(17)において、<br>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<br>れ、IWNOD(I)=0 のセグメント I については出力しない。<br>ただし、IWNOD がすべて 0 の場合は、IFEM セグメントのみ<br>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),<br>(IPRINT(6)=1 の場合のオプション)  |      |
| (1)    | 燃料温度   | 0    |
| (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    |
| (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   | 1    |
| (18)   | 熱計算の代表的出力  | 1    |
| IWRD   | 力学計算出力オプション(=0:出力しない,=1:出力する)<br>(IPRINT(7)=1 の場合のオプション)   |      |
| (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)    | 径方向クリープひずみ   | 0    |
| (7)    | 円周方向クリープひずみ  | 0    |
| (8)    | 軸方向クリープひずみ   | 0    |
| (9)    | クリープ硬化ひずみ  | 0    |
| (10)   | 相当塑性ひずみ  | 0    |
| (11)   | スウェーリングひずみ   | 0    |
| (12)   | 径方向全ひずみ  | 0    |
| (13)   | 円周方向全ひずみ   | 0    |
| (14)   | 軸方向全ひずみ  | 0    |
| (15)   | 熱ひずみ   | 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 プロッターファイルの作成 (Unit 1)   | 0    |
| IPLOPT | =0:入力した経歴点のみ書き出す<br>=1:計算したタイムステップ全点について書き出す<br>=-n:計算したタイムステップを n 点おきに書き出す<br>(ただし、入力した経歴点は必ず書き出す)<br><オフラインプロッター >   | 0    |

## 履歴データの入力方法

入力ファイルのうち履歴データ部分（カード番号 10 - 11）の作成方法を解説する。

### 出力履歴データ

出力履歴データは、A1=時間(hr)、B1=燃焼度、A2=線出力(W/cm)、A5=高速中性子束( $n / cm^2 \cdot s$ )、A3=冷却材温度(K)、A4=冷却材圧力(MPa)、IT=入力ジェネレータ、IP=出力オプション、IS=温度計算オプション、A6=冷却材速度(m/s)について入力する。ただし、A1(時間)ないしB1(燃焼度)のいづれか一方が決まれば、それにより他方は自動的に決まるので、A1、B1はどちらか一方の入力でよい。また、B1の単位系の指定は NAMELIST 中の IBUNP で行なう。IBUNP=0ならB1はMWd/t-UO<sub>2</sub>、IBUNP=1ならMWd/t-U、IBUNP=2ならB1はGJ/kg-Uである。

ITは、増分形での履歴指定を可能とする入力ジェネレーターであり、0, 100, -100のいづれかが選択できる。IT=-100では、A1(またはB1)は前段の履歴点からの時間増分(または燃焼度増分)として扱われ、IT=0では、A1(またはB1)はIT=-100を指定した1つ前の履歴点(IT=-100の指定が以前になければ最初の履歴点)からの時間経過(経過燃焼度)として扱われる。IT=100では、A1(またはB1)は最初の履歴点からの時間(燃焼度)として扱われる。

IPは出力内容指定オプションで、IP≥1は詳細出力を行なう履歴点の指定、IP=0は簡易出力のみの履歴点の指定である。

ISは温度計算における定常／非定常の切り替えフラグであるが、この切り替えは特に指定しなくてもコード中で自動的に行われるため、通常は入力する必要はない。

A6は冷却材流速(m/s)である。

全体の数値フォーマットをまとめて示す。

-FORMAT (6F 10.0, 3I5, F5.0)

| F10.0 | F10.0 | F10.0 | F10.0 | F10.0 | F10.0 | I5 | I5 | I5 | F5.0 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|----|----|------|
| A1    | B2    | A2    | A5    | A3    | A4    | IT | IP | IS | A6   |

### 相対出力分布

相対出力分布の入力方法を説明する。RHは、出力履歴データで与えたA2(線出力)に対する軸方向セグメント位置での相対出力比を指定する。したがって入力はNAX(軸方向ノード数≤12)個必要である。また、ある特定の履歴点ごとに同様な相対出力分布を与える場合には、II(履歴点オプション)を用いて入力の省略ができる。

-FORMAT (12F5.0, I5)

|                   |     |
|-------------------|-----|
| 12F 5.0           | I 5 |
| (RH(I), I=1, NAX) | II  |

## 出力履歴の入力方法

入力は、出力履歴データと相対出力分布を一組として出力履歴点数組の入力を行なう。

### 入力例(1)

軸方向 1 ノードで、500W/cmまで 10 時間で出力を上昇する場合の入力例であり、高速中性子束は  $2.5 \times 10^{13} n / cm^2 \cdot sec$  (500W/cm 到達時)、冷却材温度は 513.15(K)、冷却材圧力は 3.4 (Mpa)、冷却材速度は 3.0(m/s)である。

```
....5....0....5....0....5....0....5....0....5....0....5....0....5....0....5....0
      2
      513.15      3.4      1      3.0
      1.0
      10.0       500.0   2.5E13      1
....5....0....5....0....5....0....5....0....5....0....5....0....5....0....5....0
```

1 行目は、NHIST=2 で履歴点数は 2 である。

2 行目は、最初の履歴データで hot stand-by の状態を設定する。hot stand-by の状態は、時間 (A1) は  $10^{-5}$  (hr)、線出力 (A2) は  $10^{-3}$  ( $W / cm$ )、高速中性子束 (A5) は  $2 \times 10^9 (n / cm^2 \cdot s)$  という微少な値に自動的にセットされるので、これらについては入力の必要はない。

3 行目は、相対出力分布の入力であるが、軸方向 1 セグメントの計算であるから RH(I)=1.0 とした。履歴点オプション II=2 が指定されていることは、2 つの履歴点とも同じ相対出力分布を用いることを意味している。第 2 履歴点における履歴データの入力で、A1=10(hr), A2=500(W/cm), A5 =  $2.5 \times 10^{13} (n / cm^2 \cdot s)$  が入力されているので、タイムステップは自動分割され、分割点では履歴データは線形補間されて計算が行われる。

冷却材温度と冷却材圧力、冷却材流速の入力は省略されているが、これは、最初の履歴点と同じ値を用いることを意味しており、A3=513.14, A4=3.4, A6=3.0 と入力したのと同等である。

出力オプション IP はいずれも 1 が入力されているから、hot stand-by の状態も 500W/cm 到達時のいずれについても詳細出力がされる。

## 入力例(2)

200W/cm で 20GWd/tUO<sub>2</sub> までベース照射を行ない、出力を下げた後、250W/cm まで出力を上昇し、72 時間コンディショニングを行ない、再び 500W/cm まで出力を上昇し、24 時間保持してから出力を下げる。ただし、出力上昇速度はいずれも 200W/cm · hr とする。

ただし、高速中性子束は 500W/cm 到達時において  $10^{14}(\text{n}/\text{cm} \cdot \text{s})$  とし、冷却材温度は 513.15(K)、冷却材圧力は 3.4 (Mpa)、冷却材速度は 3.0(m/s) で一定とする。相対出力分布はベース照射中とランプ照射に対してそれぞれについて与える。ベース照射中では、5GWd/t-UO<sub>2</sub>、10GWd/t-UO<sub>2</sub>、15GWd/t-UO<sub>2</sub>、20GWd/t-UO<sub>2</sub> で計算結果の出力をを行い、ランプ照射中では、250W/cm 以上について、50W/cm ごとに結果の出力をを行う。500W/cm 保持中については、1 時間後、3 時間後、6 時間後、12 時間後、24 時間後について出力を行なう。ただし、軸方向セグメント数は 12 とする。

```

....5....0....5....0....5....0....5....0....5....0....5....0....5....0....5....0....5....0
21
0.0          0.001    2.0E09    513.15      3.4        2       3.0
0.77 0.85 0.90 0.92 0.94 0.96 0.98 1.00 1.02 1.05 1.10 1.15    7
1.0          200.0     4.0E13
5000.0
10000.0
15000.0
20000.0    200.0     4.0E13
1.0          0.001    2.0E09
1.0          0.001    2.0E09
0.93 0.94 0.95 0.96 0.97 0.98 0.99 1.00 1.01 1.02 1.04 1.06 14
1.25          250.0     5.0E13
72.0          250.0     5.0E13
0.25
0.5
0.75
1.0
1.25          500.0     1.0E14
1.0
3.0
6.0
12.0
24.0          500.0     1.0E14
2.5          0.001    2.0E09
STOP
....5....0....5....0....5....0....5....0....5....0....5....0....5....0....5....0

```

上記に示した 21 履歴点については、すべて計算結果の簡易出力がされる。その中で詳細出力のほしい履歴点のみ IP=1 とした。ただし、ネームリスト入力において IPHIS=0 を指定すると IP=0 の履歴点は簡易出力が行われない。

ここで、燃焼度の単位を MWd/tUO<sub>2</sub> するので、IBUNP=0 とした。

1 行目は履歴点数で、NHIST=21 である。

2 行目は hot stand-by における履歴データである。

3 行目は相対出力分布で、最初の履歴点から 7 番目の履歴点まで同じ相対出力分布を用いるこ

とを意味する。

4行目は2番目の履歴データでA1=1(HR), A2=200(W/cm), A5=4×10<sup>13</sup>(n/cm<sup>2</sup>s), 冷却材温度、圧力、速度は同条件である。

5~8行目は、200(W/cm)で燃焼度を20 GWd/tUO<sub>2</sub>まで進めるための入力で、5 GWd/tUO<sub>2</sub>、および15 GWd/tUO<sub>2</sub>で簡易出力が得られる。A2(線出力), A5(高速中性子束)は補間方式で求められ、この間A2=200(W/cm), A5=4×10<sup>13</sup>(n/cm<sup>2</sup>s)が用いられていることを意味する。

9行目はIT=-100がセットされている。これは8行目が燃焼度が20 GWd/tUO<sub>2</sub>であるから、この時点から1時間で出力を0.001(W/cm)まで降下したことを意味する。

10行目は、0.001(W/cm)で1時間で相対出力分布を変更したことを意味する。

11行目に与えた相対出力分布は、8番目の履歴点から最後(21番目)の履歴点までの14履歴点について適用されることを意味する。なお出力0は許されないので10<sup>-3</sup>(W/cm)程度の微少な値を入力しなければならない。

12行目は1.25時間で250(W/cm)に出力上昇し、13行目は250(W/cm)で72時間出力を保持したことを意味する。

14~18行目は250(W/cm)で72時間保持した時点から0.25時間で出力が50W/cm上昇(200W/cm·hr)したことを意味する。すなわち、IT=-100を指定した1つ前の履歴点(13行目に当る)経過時間がA1として与えてある。また、線出力は指定のない期間は線形補間されるので、14~17行目にA2=300, 350, 400, 450の値を指定したことと同等である。高速中性子束も同様で、A5=6×10<sup>13</sup>, 7×10<sup>13</sup>, 8×10<sup>13</sup>, 9×10<sup>13</sup>を入力したのと同等である。

19~23行目についても同様で500(W/cm)保持中、1時間、3時間、6時間、12時間経過における簡易出力を得るために設定した履歴データであり、24時間経過後については詳細出力を与える。24行目は24時間経過後2.5時間で出力が降下したことを意味する。なお、冷却材の温度、圧力、および速度は一定としたので、第2履歴点以降の入力は省略した。また、線出力および高速中性子束は、入力による指定がない期間は、前後の入力値から線形補間されて計算条件とされるので、最終履歴点に入力値(>0)がないと入力エラーとなる。

## A 4 プロット入力マニュアル

| 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)   |     |           |
| 4 | ITOPT; グラフの種類の指定<br>ITOPT=0 X 軸を時間、燃焼度、線出力とする。<br>ITOPT=1 X 軸を径、または軸方向座標とする。<br>ITOPT=2 実測値との比較図を作成する。<br>(この場合は実測値が線を 1 本使うので、<br>IRUM は最大 4 本となる。)<br><br>ISYM; センターシンボルのオプション<br>=0 センターシンボルをプロットしない<br>=1 センターシンボルをプロットする   | (*) | 軸の設定      |
|   | ILOPT, IXOPT2, IYOPT2, IYNUM, (IYOPT(I), I=1, IYNUM)  | (*) |           |
| 5 | IXOPT; X 軸の内容を指定する。 (ITOPT=0 or 2 の場合に指定する)<br>=1 時間<br>=2 径方向座標 (-); ITOPT=1 の場合に指定する。<br>=3 軸方向座標 (-); ITOPT=1 の場合に指定する。<br>=4 燃焼度 (着目セグメント)<br>=5 線出力 (着目セグメント, W/cm)<br>=6 燃焼度 (全セグメント平均)<br>=7 線出力 (全セグメント平均, W/cm)<br><br>IXOPT2; 時間、燃焼度の単位を指定する。<br>・ X 軸を時間 (IXOPT=1) とした場合の単位指定<br>IXOPT2=0 Hour,                   IXOPT2=1 Day<br>・ X 軸を燃焼度 (IXOPT=4 or 6) とした場合の単位指定<br>IXOPT2=0 MWd / tUO <sub>2</sub><br>IXOPT2=1 GWd / tUO <sub>2</sub><br>IXOPT2=2 MWd / tU<br>IXOPT2=3 GWd / tU<br><br>IYOPT2; 燃焼度の単位を指定する<br>・ Y 軸を燃焼度 (IYOPT(I)=1 or 12) とした場合の単位指定<br>IYOPT2=0 MWd / tUO <sub>2</sub><br>IYOPT2=1 GWd / tUO <sub>2</sub><br>IYOPT2=2 MWd / tU<br>IYOPT2=3 GWd / tU<br><br>IYNUM; Y 軸の数。Y 軸を 2 種類以上 (=2 種類以上の物理量、IYNUM ≥ 2)<br>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。<br><br>(IYOPT(I), I=1, IYNUM);<br>Y 軸の内容を表(1)~(3)から選択して、番号を入力する。 | (*) | 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)<br>(IZ(I), I=1, IRNUM)                          | (*)      | 軸方向メッシュ番号<br>図ごとに軸方向メッシュ番号を指定する<br>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, IRNUM)                          | (*)      | タイムステップ番号<br>(ITOPT=0 または2の場合は(ITIM(I), I=1, 2)で入力する)<br>ITIM(1)= 図の始点のタイムステップ番号を指定する<br>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, IRNUM)で入力する)<br>図ごとにタイムステップ番号を指定する。   |
| 8        | X0, XM, XNUM, IXN, IFLAG  | (*)      | X軸目盛の設定<br>IXOPT=2, 3のときはダミー<br>X0 ; X 軸目盛りの最小値 (IFLAG ≠ 3)<br>XM ; X 軸目盛りの最大値 (IFLAG ≠ 3)<br>XNUM ; X 軸目盛りの間隔 (IFLAG ≠ 3)<br>IXN ; X 軸目盛りの小数点以下の桁数 (IFLAG ≠ 3)<br>(例) 10 のとき IXN=-1<br>10.0 のとき IXN=1<br>10.00 のとき IXN=2<br><br>IFLAG ≠ 3 : X 軸目盛りに自動スケールを適用しない。<br>=3 : X 軸目盛りに自動スケールを適用する。  |
| 9        | IYNUM 枚必要 (I = 1, IYNUM)<br>Y0(I), YM(I), YNUM(I), IYN(I), IFLAG(I) | (*)      | Y軸目盛の設定<br>Y0(I) ; Y 軸目盛りの最小値 (IFLAG(I) ≠ 3)<br>YM(I) ; Y 軸目盛りの最大値 (IFLAG(I) ≠ 3)<br>YNUM(I); Y 軸目盛りの間隔 (IFLAG(I) ≠ 3)<br>IYN(I) ; Y 軸目盛りの小数点以下の桁数 (IFLAG(I) ≠ 3)<br>(IXN と同様に入力)<br><br>IFLAG(I); Y 軸目盛りのオプション<br>=0 目盛りを実数タイプで描く (小数表示)<br>=1 目盛り E タイプで描く (指数表示)<br>=2 Y 軸目盛りを対数とする<br>=3 Y 軸目盛りに自動スケールを適用する<br>[IFLAG(I)=3 の時は自動スケールなので Y0～IYN はダミー] |

(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。

(注2) (\*)で指定したデータはフリーフォーマットで作成する。

## Y 軸の内容(1)

(\*\*) : IYOPT2 によって指定される。

| 群                  | NO | 項目                          | 単位                   |
|--------------------|----|-----------------------------|----------------------|
| A<br>時間・燃焼度に対するデータ | 1  | 燃料棒平均燃焼度                    | (**)                 |
|                    | 2  | FP ガス放出率                    | (%)                  |
|                    | 3  | 燃料棒内圧                       | (MPa)                |
|                    | 4  | プレナム体積                      | (cc)                 |
|                    | 5  | ペレット伸び (指定セグメントにおけるペレットの伸び) | (%)                  |
|                    | 6  | 燃料棒全長の伸び                    | (%)                  |
|                    | 7  | 被覆管最大外径変化                   | ( $\mu$ m)           |
|                    | 8  | 軸方向平均線出力                    | (w/cm)               |
|                    | 9  | 平均 Iodine 濃度                | (g/cm <sup>2</sup> ) |
|                    | 10 | 最大 Iodine 濃度                | (g/cm <sup>2</sup> ) |
|                    | 67 | 被覆管平均外径変化                   | ( $\mu$ m)           |

## Y 軸の内容(2)

(\*\*) : IYOPT2 によって指定される。

| 群                        | NO | 項目   | 単位                    |
|--------------------------|----|--|-----------------------|
| B<br>時間・燃焼度と軸方向座標に対するデータ | 11 | 線出力 (熱計算)  | (W/cm)                |
|                          | 12 | 燃焼度 (熱計算)  | (**)                  |
|                          | 13 | 全ギャップ幅 (力学的解析の算出値。軸方向セグメントについて、下から上への順に出力)             | ( $\mu$ m)            |
|                          | 14 | P CM I 圧力 (径方向)  | (MPa)                 |
|                          | 15 | F P ガス放出率 (熱計算)  | (%)                   |
|                          | 16 | ペレット-被覆管摩擦力 (軸方向、力学的解析の算出値)                            | (MPa)                 |
|                          | 17 | ペレット伸び (17 と 18 は、力学的解析の結果であり、被覆管伸び 方向セグメントについて下から上の順に | (%)                   |
|                          | 18 | 出力される)   | (%)                   |
|                          | 19 | ギャップコンダクタンス (熱計算)                                      | (W/cm <sup>2</sup> C) |
|                          | 20 | 冷却材温度 (熱計算)  | (°C)                  |
| C<br>時間・燃焼度と軸方向座標に対するデータ | 21 | 被覆管内面温度 (熱計算)  | (°C)                  |
|                          | 22 | 被覆管外面温度 (熱計算)  | (°C)                  |
|                          | 23 | ペレット中心温度 (熱計算)   | (°C)                  |
|                          | 24 | ペレット外面温度 (熱計算)   | (°C)                  |
|                          | 25 | 被覆管外径変化 (力学的解析の算出値、13 と同様の出力)                          | ( $\mu$ m)            |
|                          | 26 | X e + K r 組成 (熱計算)                                     | (%)                   |
|                          | 68 | ペレット密度 (熱計算)   | (T·D)                 |
|                          | 69 | 酸化膜-金属相界面温度  | (°C)                  |
|                          | 70 | 酸化膜厚み  | ( $\mu$ m)            |

## 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)   |
|         | 29 | ペレット径方向応力                      | (MPa)   |
| 時間・燃焼度と | 30 | ペレット周方向応力                      | (MPa)   |
|         | 31 | ペレット軸方向応力                      | (MPa)   |
| 軸方向座標及び | 32 | ペレット径方向弾性ひずみ                   | (0.01%) |
|         | 33 | ペレット周方向弾性ひずみ                   | (0.01%) |
|         | 34 | ペレット軸方向弾性ひずみ                   | (0.01%) |
| に対するデータ | 35 | ペレット相当クリープひずみ                  | (0.01%) |
|         | 36 | ペレット径方向クリープひずみ                 | (0.01%) |
|         | 37 | ペレット周方向クリープひずみ                 | (0.01%) |
|         | 38 | ペレット軸方向クリープひずみ                 | (0.01%) |
| 径方向座標   | 39 | ペレット相当塑性ひずみ                    | (0.01%) |
|         | 40 | ペレット径方向ひずみ                     | (0.01%) |
|         | 41 | ペレット周方向ひずみ                     | (0.01%) |
|         | 42 | ペレット軸方向ひずみ                     | (0.01%) |
|         | 43 | ペレット径方向熱膨張ひずみ                  | (0.01%) |
|         | 44 | ペレット軸方向熱膨張ひずみ                  | (0.01%) |
|         | 45 | ペレットスウェーリングひずみ( $\angle L/L$ ) | (0.01%) |
|         | 46 | ペレット要素温度                       | (°C)    |
|         | 47 | ペレット FP ガス放出率                  | (%)     |
|         | 48 | 被覆管相当応力                        | (MPa)   |
|         | 49 | 被覆管平均応力                        | (MPa)   |
|         | 50 | 被覆管径方向応力                       | (MPa)   |
|         | 51 | 被覆管周方向応力                       | (MPa)   |
|         | 52 | 被覆管軸方向応力                       | (MPa)   |
|         | 53 | 被覆管径方向弾性ひずみ                    | (0.01%) |
|         | 54 | 被覆管周方向弾性ひずみ                    | (0.01%) |
|         | 55 | 被覆管軸方向弾性ひずみ                    | (0.01%) |
|         | 56 | 被覆管相当クリープひずみ                   | (0.01%) |
|         | 57 | 被覆管径方向クリープひずみ                  | (0.01%) |
|         | 58 | 被覆管周方向クリープひずみ                  | (0.01%) |
|         | 59 | 被覆管軸方向クリープひずみ                  | (0.01%) |
|         | 60 | 被覆管相当塑性ひずみ                     | (0.01%) |
|         | 61 | 被覆管径方向ひずみ                      | (0.01%) |
|         | 62 | 被覆管周方向ひずみ                      | (0.01%) |
|         | 63 | 被覆管軸方向ひずみ                      | (0.01%) |
|         | 64 | 被覆管径方向熱膨張ひずみ                   | (0.01%) |
|         | 65 | 被覆管軸方向熱膨張ひずみ                   | (0.01%) |
|         | 66 | 被覆管スウェーリングひずみ                  | (0.01%) |
|         | 71 | 被覆管要素温度                        | (°C)    |
|         | 72 | 被覆管軸方向平均熱膨張ひずみ                 | (0.01%) |
|         | 73 | 燃焼度分布                          | (**)    |

### [プロットデータのY軸物理量(3); Cグループに関するコメント]

以下の説明において、47番のFPガス放出率は、軸方向セグメント毎に出力されるので、例外とする。

(1) 27~46の物理量 ×印は応力・ひずみ・温度評価点=ガウスの積分点。

Center line of Pellet

| [半径方向には10分割] |   |   |   |   |   |   |   |   |    |         |
|--------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|---------|
| IR=1         | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |         |
| ×            | × | × | × | × | × | × | × | × | ×  | 8 (軸方向) |
| ×            | × | × | × | × | × | × | × | × | ×  | 7 セグメント |
| ×            | × | × | × | × | × | × | × | × | ×  | 6 数≤12) |
| ×            | × | × | × | × | × | × | × | × | ×  | 5       |
| ×            | × | × | × | × | × | × | × | × | ×  | 4       |
| ×            | × | × | × | × | × | × | × | × | ×  | 3       |
| ×            | × | × | × | × | × | × | × | × | ×  | 2       |
| ×            | × | × | × | × | × | × | × | × | ×  | IZ=1    |

(2) 48~66の物理量: ×印は応力評価点=ガウスの積分点。

標準設定: IR=1 2

|   |   |   |
|---|---|---|
| × | × | 8 |
| × | × | 7 |
| × | × | 6 |
| × | × | 5 |
| × | × | 4 |
| × | × | 3 |
| × | × | 2 |
| × | × | 1 |

## A 5 サンプル入出力の説明

タイトル画面  
(必ず出力される)

入力ファイルのカード1に記述したタイトルを表記

EXTENDED BURN-UP FUEL ANALYSIS

---

VERSION 1.0

BURN DATE 9/7/Sep/11  
TIME 18:38:25

**INPUT DATA LIST**

```

CARD NO. 1. EXBURN Sample Case No. 1 (BWR Fuel Rod)
          & INPUT IBUNP=1, IPLO=1, IRGFAU=1, ICORR0=1, IFIX=0, GRWF=1.0, DTPL=2.0,
          IPRINT(1)=3*0, IWRD=18*1, IWNOD(4)=1, IPHIS=0,
          &END
          5.   8     4     2
          6.   0     1.078   1.25
          7.   0     0     1.06
          8.   0     0     1.06
          9.   0     0     1.06
          10.  0     0     1.06
          11.  0     0     1.06
          12.  0     0     1.06
          13.  0     0     1.06
          14.  0     0     1.06
          15.  33.6  0.1013  1.0
          16.  11    0.01   1.0
          17.  0.01  1.14  1.20  1.16 1.15 1.15
          18.  0.80  1.05  1.14  1.20  1.16 1.15 1.15
          19.  3.00  210.00 210.00
          20.  5.00  7500.0 270.0
          21.  5.00  15000.0 260.0
          22.  5.00  30000.0 360.0
          23.  5.00  22500.0 300.0
          24.  5.00  22500.0 280.0
          25.  5.00  30000.0 280.0
          26.  5.00  30000.0 0.10  8.00+13
          27.  5.00  30000.0 0.10  2.60+13
          28.  STOP
          ... 5.00  5.00  5.00  5.00  5.00  5.00  5.00

```

## EXBURN Sample Case No. 1 (BWR Fuel Rod)

## B.W.R. FUEL ROD.

## \*INPUT DATA

| 0(1) PELLET SPECIFICATIONS          |               |         | SHAPE | U-235<br>CHAMF | FRACTIONAL<br>DENSITY | ONE PELLET<br>LENGTH (cm) | SEG.<br>LENGTH (cm) |
|-------------------------------------|---------------|---------|-------|----------------|-----------------------|---------------------------|---------------------|
| 0                                   | SEG<br>INSIDE | OUTSIDE | DISH  | 0.030          | 0.950                 | 1.070                     | 45.750              |
| 8                                   | 0.000         | 1.060   |       | 0.030          | 0.950                 | 1.070                     | 45.750              |
| 7                                   | 0.000         | 1.060   |       | 0.030          | 0.950                 | 1.070                     | 45.750              |
| 6                                   | 0.000         | 1.060   |       | 0.030          | 0.950                 | 1.070                     | 45.750              |
| 5                                   | 0.000         | 1.060   |       | 0.030          | 0.950                 | 1.070                     | 45.750              |
| * 4                                 | 0.000         | 1.060   |       | 0.030          | 0.950                 | 1.070                     | 45.750              |
| 3                                   | 0.000         | 1.060   |       | 0.030          | 0.950                 | 1.070                     | 45.750              |
| 2                                   | 0.000         | 1.060   |       | 0.030          | 0.950                 | 1.070                     | 45.750              |
| 1                                   | 0.000         | 1.060   |       | 0.030          | 0.950                 | 1.070                     | 45.750              |
| PELLET TOTAL WEIGHT (GRAM)          |               |         | =     | 3362.400       |                       |                           |                     |
| GRAN SIZE (M CRON)                  |               |         | =     | 10.000         |                       |                           |                     |
| MAXIMUM FRACTIONAL DENSITY          |               |         | =     | 0.960          |                       |                           |                     |
| 90% DENSIFICATION BURNUP (MWd/TU02) |               |         | =     | 2560.000       |                       |                           |                     |

## (2) OTHERS

インプットデータリスト  
(IPRINT(1)=1 で出力)

燃料設計データ  
(IPRINT(2)=1 で出力)

(1) ベレット  
内径、外径、形状、U-235 濃縮度、密度比、高さ、軸方向セグメント長  
着目セグメントには\*マーク  
ディッシュ・チャンファ付きペレットの場合  
はその体型、ペレット総重量、粒径、やきしまりによる到達密度、完了燃焼度

|   |                 |
|---|-----------------|
| (2) その他<br>被覆管材質、内径、外径、<br>サー・マル・リコ・ケーション割合、<br>上部・下部プレナム体積、初期ガス圧力、塑<br>性、ペレット・被覆管表面粗さ、室温 | PRINT(4)=1 で出力) |
|---|-----------------|

Clad material is fully annealed zircaloy  
 Clad inside diameter (cm) = 1.078  
 Clad outside diameter (cm) = 1.250  
 Initial thermal relocation (-) = 0.200  
 Upper plenum volume (cm<sup>3</sup>) = 33,600  
 Lower plenum volume (cm<sup>3</sup>) = 0,000  
 Initial gas pressure (MPa) = 0.101  
 Initial gas composition (%)  
 HELIUM = 100.0  
 N2 = 0.0  
 KRYPTON = 0.0  
 XENON = 0.0  
 Pellet surface roughness (cm) = 0.0001  
 Cladding surface roughness (cm) = 0.0001  
 Room temperature (Deg. C) = 18.00

## Name list parameters (1)

| Parameter                     | Description  | Dimension                  | Value                   |
|-------------------------------|--|----------------------------|-------------------------|
| (1) Option for input          |  |                            |                         |
| IBUND                         | Input for burn unit (=0:MW/t002 ,=1:MW/dtU ,=2:GJ/kgU)                       | -                          | 1                       |
| IDAY                          | Option for time unit (=0:hr ,=1:day)   | -                          | 0                       |
| IFEX                          | Option to use radial flux depression profile                                 | -                          | 0                       |
| IRAI                          | Power increment width for extended segment                                   | -                          | 0                       |
| PINCIG                        | Calculate the line output by multiplying the factor (=1+PINCIG)              | -                          | 0.00                    |
| FANW                          | Fast neutron flux per [W/cm <sup>2</sup> sec/cm <sup>2</sup> s]              | n/cm <sup>2</sup> sec/W/cm | 0.000E+00               |
| ICLMAS                        | Option for coolant flow (=0:velocity(m/s), mass flux (kg/cm <sup>2</sup> s)) | -                          | 0                       |
| (2) Option for calculation    |  |                            |                         |
| INPCK                         | Input data check option (=0:calculation ,=1:input data check)                | -                          | 0                       |
| IKM                           | FEM mechanical calculation option (=0:calculate ,=1:not calculate)           | -                          | 0                       |
| ICHI                          | Elastic calculation option (=0:normal ,=1:elastic)                           | -                          | 0                       |
| IMPP                          | Thermal calculation option (=0:standard ,=1:simple)                          | -                          | 0                       |
| ITLM                          | Limiting time for CPU  | sec                        | 20000.00                |
| (3) Condition for calculation |  |                            |                         |
| ITIME                         | Number of history points changing plenum gas pressure                        | -                          | 0                       |
| IGASRN                        | Plenum gas pressure at the history point                                     | Pa                         | 0.000                   |
| IPLEMN                        | Plenum gas volume at the history point                                       | cm <sup>3</sup>            | 0.000                   |
| GMXN                          | Plenum gas composition at the history point (He, N2, Kr, Xe)                 | -                          | 0.000 0.000 0.000 0.000 |
| (4) Material properties       |  |                            |                         |
| TOP1                          | Bottom plenum option (=0: no bottom ,=1: bottom plenum is present)           | -                          | 0                       |
| XKSU                          | Elastic constant of upper plenum   | n/m                        | 1500.00                 |
| ALSU                          | Thermal expansion ratio of upper plenum spring                               | 1/K                        | 1.500E-05               |
| YKSL                          | Elastic constant of lower plenum   | n/m                        | 2500.00                 |
| ALSL                          | Thermal expansion ratio of lower plenum spring                               | 1/K                        | 1.500E-05               |
| AMU                           | Friction coefficient between pellet and cladding                             | -                          | 0.40                    |
| DE                            | Equivalent hydraulic diameter  | cm                         | 0.47                    |
| FAREA                         | Flow area of coolant   | cm <sup>2</sup>            | 0.46                    |

PITCH Fuel rod pitch cm 1.30  
 NRC2R Number of radial segments of clad zircaloy - 2  
 NRCOX Number of radial segments of clad oxide layer - 2  
 DTPC Difference between plenum temperature and coolant temp. - 2.00

## Name list parameters(2)

| Parameter  | Description   | Dimension | Value     |
|--|---|-----------|-----------|
| <b>(1) Control of time step</b>                    |   |           |           |
| IAUTO  | Option for automatic control of time step   | -         | -         |
| DXXX   | Upper limit of power dependent time step  | W/cm      | 10.000    |
| DBBU   | Upper limit of burnup dependent time step   | MWd/tU02  | 500.000   |
| IPH  | Power increment width for attended segment<br>(=0: ITEM segment, =1: maximum power segment) | -         | 0         |
| EFODEF   | Creep dependent time step control parameter   | -         | 1.000     |
| LMAX   | Maximum number of judgements of pellet-clad contact state                                   | -         | 3         |
| LMAX   | Number of iteration of Newton-Lapson method   | -         | 2         |
| LTIMY  | Time step control option for elasto-plastic analysis  | -         | -1        |
| FAC  | Time step control factor  | -         | 1.000E+04 |
| <b>(2) Option for thermal conductance</b>          |   |           |           |
| IPTHON   | Option for pellet thermal conductivity (=0, 1: MATPRO-09, =1: Lyos)                         | -         | 1         |
| MOX  | MOX=1 adopts Martin's thermal conductivity formula  | -         | 0         |
| PU   | Mole fraction when MOX=1  | -         | 0.000     |
| Y  | Value of Y for MO2-Y  | -         | 0.000     |
| IDD  | IDD adopts thermal conductivity formula by Fukushima  | -         | 0         |
| GD   | Density of GB203 (weight fraction)  | -         | 0.000     |
| <b>(3) Option for thermal expansion</b>            |   |           |           |
| IPRHEX   | Option for formula of pellet thermal expansion  | -         | 0         |
| ICATHX   | Option for formula of clad thermal expansion  | -         | 0         |
| AIRHEX   | Zircaloy thermal expansion (for axial expansion)  | -         | 4.441E-06 |
| RIRHEX   | Zircaloy thermal expansion (for radial expansion)   | -         | 6.721E-06 |
| <b>(4) Option for creep</b>                        |   |           |           |
| FIRFAC   | Magnification on pellet creep formula (mechanical model)                                    | -         | -         |
| TCS  | Cut off value of temp. within pellet creep cal (mechanical model)                           | K         | 10.000    |
| TCRMX  | Cut off value of temp. within pellet creep cal (thermal model)                              | K         | 2073.150  |
| CREFAC   | Magnification on clad creep strain rate (mechanical model)                                  | -         | 1773.150  |
| PPUGH  | PPUGH=1 takes into account of Pugh's turn over in clad creep cal.                           | -         | 1.000     |
| <b>(5) Option for pellet crack, and relocation</b> |   |           |           |
| XRELOC   | Relocation parameter in thermal calculation   | -         | 0.200     |
| FRELOC   | Mechanical relocation parameter   | -         | 0.500     |
| EPSRL2   | Axial relocation parameter  | -         | 0.003     |
| FAGR   | Option for pellet stiffness recovery in radial direction                                    | -         | 1.000     |
| FACTZ  | Option for pellet stiffness recovery in axial direction                                     | -         | 1.000     |
| BURNIN   | Burnup at which pellet relocation starts  | MWd/tU    | 0.000     |
| BURNAX   | Burnup at which pellet relocation ceases  | MWd/tU    | 0.000     |
| IURS   | Option for pellet gas bubble swelling calculation   | -         | 0         |

|  |  |                    |            |
|--|--|--------------------|------------|
| ING                                      | Pellet crack model option (mechanical model)                             | -                  | 1          |
| ECRAC3                                   | Elastic modulus of pellet at the time of perfect crack (mech. model)     | Pa                 | 2.000E+09  |
| (6) Option for pellet densification      |  |                    |            |
| IDENSF                                   | Option for formula of pellet densification                               | %                  | 0          |
| DMAX                                     | Maximum volume shrinkage ratio by densification                          | mm/tU              | 0.960      |
| SBL                                      | Burnup at which densification is 90% completed (IDENSF = 0)              | K                  | 2500.000   |
| TDSNF                                    | Starting temperature   | K                  | 2000.000   |
| GG                                       | Grain size after heat treatment  | m                  | 1.000E-05  |
| GGO                                      | Initial grain size (IDENSF = 3)  | m                  | 8.000E-06  |
| STIM                                     | Time of heat treatment (IDENSF = 3)                                      | hr                 | 24.000     |
| AJUST                                    | Adjust. fact. (IDENSF=4)   | -                  | 0.600      |
| (7) Option for pellet swelling model     |  |                    |            |
| IFSWEL                                   | Option for pellet swelling model   | -                  | 0          |
| STOP                                     | Contact pressure limit beyond which gas bubble cannot occur (mechanical) | Pa                 | -3.000E-07 |
| SPCON                                    | Contact pressure limit beyond which gas bubble cannot occur (thermal)    | Pa                 | -1.000E+06 |
| FACP                                     | Factor magnifying contact pressure affecting bubble outer pressure       | -                  | 1.000      |
| BG                                       | Number of atoms in a boundary bubble                                     | atoms/bubble       | 5.000E+08  |
| (8) Option for pellet hotpress model     |  |                    |            |
| BETAX                                    | Pellet hotpress parameter  | -                  | 0.002      |
| IHOT                                     | Option for pellet hotpress parameter                                     | -                  | 0          |
| (9) Option for plastic model             |  |                    |            |
| IFY                                      | Option for pellet plastic model  | -                  | 1          |
| ISTR                                     | Determines k of curvature of yield stress in zircaloy                    | kg/mm <sup>2</sup> | 0          |
| (10) Option for irradiation growth model |  |                    |            |
| IGAGRW                                   | Option for formula of clad irradiation growth                            | -                  | 1          |
| CATEXF                                   | Factor fz for axial direction (IGAGRW = 1)                               | -                  | 0.050      |
| COLDW                                    | Cold work Gw (IGAGRW = 1)  | -                  | 0.810      |
| (11) Option for FP gas release model     |  |                    |            |
| IGASP                                    | Fission gas release model option   | -                  | 0          |
| IRIM                                     | Fission gas release model option in rim                                  | -                  | 1          |
| IGAS                                     | Gas option for temperature zone model                                    | -                  | 0          |
| APORE                                    | Bubble radius in initial grains  | cm                 | 0.000E+00  |
| BFCT                                     | Magnitude resolution rate from intergranular bubbles to matrix           | -                  | 1.000      |
| FACD                                     | Magnitude effective intrinsic diffusion coefficient                      | -                  | 1.000      |
| ADDF                                     | Magnitude resolution rate from intergranular to inside                   | -                  | 9.000      |
| PBSAT                                    | Magnitude gas saturation at intergranular                                | -                  | 1.000      |
| PSAT                                     | Maximum value of pressure in intergranular bubble                        | Pa                 | 1.000E-08  |
| IPEXT                                    | Option for pressure Pext to intergranular bubble                         | -                  | 1.000      |
| FGG                                      | Magnitude grain growth cleanup ratio                                     | -                  | 1.000      |
| REFGFC                                   | Magnitude FP gas release rate by rim area                                | -                  | 1.000      |
| FRMIN                                    | Minimum release rate of FP gas release rate                              | s                  | 0.500      |
| THEAIF                                   | Interpolation parameter used in grain diffusion equation                 | -                  | 1.000      |
| TMULT                                    | Adjustment factor of time step in FP gas release model                   | -                  | 1.000      |
| NODEG                                    | Mesh number within grain in FP gas release model                         | -                  | 3          |
| IREL                                     | Divide ratio of mesh within grain in gas release model                   | -                  | 5.00       |
| OPORO                                    | Radius of boundary layer (mesh for resolution)                           | cm                 | 2.000E-06  |
| ALHOT                                    | Ratio of open porosity   | -                  | 0.000      |
|  | Factor magnifying relaxation of stress affecting bubble outer press.     | -                  | 1.000E-04  |

|  |  |            |           |
|--|--|------------|-----------|
| APEXT                                  | Factor magnifying of stress affecting bubble outer press.                | (IPEXT=14) | -         |
| HERLS                                  | Factor magnifing of He gas release rate                                  | -          | 3.000     |
| FACHE                                  | Factor magnifying of He gas produce rate                                 | -          | 1.000     |
| <hr/>                                  |  |            |           |
| (12) Option for U02 grain growth model |  |            |           |
| I0RAIN                                 | Option for formula in U02 grain growth                                   | -          | 0         |
| GR                                     | Grain size   | micron     | 10.000    |
| GWNF                                   | Magnify grain growth rate  | -          | 1.000     |
| AG                                     | Fitting parameter { grain growth suppression term }                      | -          | 1.000     |
| <hr/>                                  |  |            |           |
| (13) Option for He gas release model   |  |            |           |
| NVHE                                   | Number of time points determined by TVHE                                 | -          | 0         |
| <hr/>                                  |  |            |           |
| (14) Option for gas flow model         |  |            |           |
| DMIN                                   | Minimum gap width between pellet and clad in gas flow model              | cm         | 0.001     |
| TNG1                                   | Interpolation parameter of volume etc. used in axial FP gas flow model   | -          | 1.000     |
| THG2                                   | Interpol. param. used in diffusion cal. of axial FP gas flow model       | -          | 1.000     |
| AM1MX2                                 | Maximum transfer mol number in each segment                              | mol        | 1.000E-06 |
| AM1MX3                                 | Maximum value of FP gas release in each segment                          | mol        | 2.000E-06 |
| OTPR                                   | Ratio of vol. of FP gas release to that of plenum gas at each time step  | -          | 0.010     |
| ETA                                    | Control parameter (used in determining time step width)                  | -          | 0.050     |
| <hr/>                                  |  |            |           |
| (15) Option for corrosion model        |  |            |           |
| FCORRO                                 | Option for clad waterside corrosion model                                | -          | 1         |
| PBR                                    | Acceleration factor of oxide layer growth rate                           | -          | 0.000     |
| QNEAC                                  | Piling-below ratio of zirconia   | -          | 1.400     |
| QXTH                                   | Factor magnifying oxide layer thermal conductivity                       | -          | 1.000     |
| OXTHMX                                 | Thickness of initial oxide layer on outer surface at each segment micron | micron     | 200.000   |
| CNOX                                   | Thickness of maximum oxide layer on outer surface                        | -          | 0.000     |
| <hr/>                                  |  |            |           |
| (16) Option for gap conductance model  |  |            |           |
| IGAPON                                 | Option for gap conductance model   | -          | 0         |
| R1                                     | Roughness of pellet surface  | cm         | 1.000E-04 |
| <hr/>                                  |  |            |           |
| (17) Option for film conductance model |  |            |           |
| ISGNHAL                                | Haliden surface heat-transfer coefficient                                | -          | 0         |
| AKFAC                                  | Magnify clad surface thermal conductivity by AKFAC                       | -          | 1.000     |
| <hr/>                                  |  |            |           |
| (18) Option for cladding anisotropy    |  |            |           |
| H0(2)                                  | Cladding anisotropy parameter  | -          | 1.000     |
| F0(2)                                  | Cladding anisotropy parameter  | -          | 1.000     |
| G0(2)                                  | Cladding anisotropy parameter  | -          | 1.000     |

Name list parameters(3)

| Input option | Description | Value |
|--------------|-------------|-------|
| Parameter    |             |       |

## (1) Option for output/plotting

```

IPRINT      Output option (=0:off ,=1:on)
            = 1: input data list
            = 2: fuel design data
            = 3: mesh and geometry data
            = 4: parameters list
            = 5: history data list
            = 6: thermal results (every time step)
            = 7: mechanical results (every time step)
            = 8: thermal results (therma | model)
            = 9: mechanical results (therma | model)
            = 10: FP gas results (every segment)
            = 11: FP gas results (whole rod)
            = 12: fuel-clad displacement (mechanical model)
            = 13: fuel stress and strain (mechanical model)
            = 14: cladding stress and strain (mechanical model)
            = 15: final information (plotter)
            = 16: thermal behavior (plotter)
            = 17: FP gas behavior (plotter)
            = 18: mechanical behavior (plotter)
            = 19: Option for output of history points (=0:only appointed points ,=1:all points) 0

```

## (2) Option for segment output

```

INNOD      Axial segment print and plotter option (=0:off ,=1:on) 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0

```

## (3) Option for output of thermal calculation

```

INTHE      Thermal information output option (=0:off ,=1:on)
            = 1: temperature
            = 2: gap gas
            = 3: grain radius
            = 4: int. bubble radius
            = 5: int. bubble density
            = 6: diffusion coeff.
            = 7: effact. diff. coeff.
            = 8: grain atoms
            = 9: boundary atoms
            = 10: released atoms
            = 11: gr. thou. atoms
            = 12: gr. thou. rel. atoms
            = 13: produced atoms
            = 14: fission gas release
            = 15: boundary density
            = 16: boundary sat. density
            = 17: boundary pressure
            = 18: burnup
            = 19: thermal information
            = 20: thermal general output

```

## (4) Option for output of dynamical calculation

```

INRDD      Element information output control table (=0:off ,=1:on)
            = 1: radial stress
            = 2: circum. stress
            = 3: axial stress
            = 4: equil. stress
            = 5: yield stress
            = 6: radial creep strain
            = 7: circum. creep strain

```

= 8: axial creep strain  
 = 9: equi. hard strain  
 = 10: equi. plas. strain  
 = 11: swelling strain  
 = 12: radial total strain  
 = 13: circum. total strain  
 = 14: axial total strain  
 = 15: thermal strain  
 = 16: element temperature  
 = 17: pressure  
 = 18: node displacement

## (5) Option for setting plotter tape

PLT Draw up plotter tape options (=; no, =!; yes)  
 IPLOPT Interval of time step point for draw up plotter tape

## \*\*\*\*\* HISTORY DATA (1) \*\*\*\*\*

| STAGE NO. (NHIST) | TIME (H : M : S) | BURNUP (MW/TH02) (MW/TU) | L.H.R. (W/CM) | COOLANT TEMP. (DEG. K) | COOLANT PRESS. (MPA) | COOLANT VELOCITY (W/S) | FAST NEW RON FLUX (N/CM2/SEC) | HISTORY OPTION (0=OFF) (1=ON) | SS/US OPTION (1=ON) |
|-------------------|------------------|--------------------------|---------------|------------------------|----------------------|------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------|
| 1                 | 0 : 0 : 0        | 0.0                      | 0.0           | 0.0                    | 0.0                  | 550.00                 | 7.00                          | 2.0                           | 8.0000+13           |
| 2                 | 5 : 0 : 0        | 3.5                      | 0.30          | 270.0                  | 550.00               | 7.00                   | 2.0                           | 8.0000+13                     | 0                   |
| 3                 | 5394:40:30       | 6610.8                   | 7500.0        | 647.20                 | 550.00               | 7.00                   | 2.0                           | 8.0000+13                     | 0                   |
| 4                 | 5399:40:30       | 6616.9                   | 7506.8        | 647.79                 | 550.00               | 7.00                   | 2.0                           | 8.0000+13                     | 0                   |
| 5                 | 10594: 8:43      | 13221.7                  | 15000.0       | 1294.40                | 260.0                | 550.00                 | 7.00                          | 2.0                           | 8.0000+13           |
| 6                 | 10999: 8:43      | 13228.0                  | 15007.2       | 1295.03                | 300.0                | 550.00                 | 7.00                          | 2.0                           | 8.0000+13           |
| 7                 | 15847:26:11      | 19822.5                  | 22500.0       | 1941.61                | 300.0                | 550.00                 | 7.00                          | 2.0                           | 8.0000+13           |
| 8                 | 15852:26:11      | 19839.                   | 22507.5       | 1942.25                | 280.0                | 550.00                 | 7.00                          | 2.0                           | 8.0000+13           |
| 9                 | 21046:51:19      | 26443.4                  | 30000.0       | 2588.81                | 280.0                | 550.00                 | 7.00                          | 2.0                           | 8.0000+13           |
| 10                | 21051:51:19      | 26446.5                  | 30003.6       | 2589.12                | 0.1                  | 550.00                 | 7.00                          | 2.0                           | 8.0000+13           |
| 11                | 21052:51:19      | 26446.5                  | 30003.6       | 2589.12                | 0.1                  | 291.15                 | 0.10                          | 2.0                           | 2.0000+13           |

LAST STAGE NUMBER = 11

## \*\*\*\*\* HISTORY DATA (2) \*\*\*\*\*

| STAGE (NHIST) | TIME (H : M : S) | L.H.R. (W/CM) | ( 1 ) | ( 2 ) | ( 3 ) | ( 4 ) | ( 5 ) | AXIAL SEG. PEAKING FACTOR ( 7 ) | ( 8 ) | ( 9 ) | ( 10 ) | ( 11 ) | ( 12 ) |
|---------------|------------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------------------------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 1             | 0 : 0 : 0        | 0.00          | 0.800 | 1.050 | 1.140 | 1.200 | 1.160 | 1.150                           | 1.000 | 0.500 | 0      | 0      | 0      |
| 2             | 5394:40:30       | 270.00        | 0.800 | 1.050 | 1.140 | 1.200 | 1.160 | 1.150                           | 1.000 | 0.500 | 0      | 0      | 0      |
| 3             | 5399:40:30       | 270.00        | 0.800 | 1.050 | 1.140 | 1.200 | 1.160 | 1.150                           | 1.000 | 0.500 | 0      | 0      | 0      |
| 4             | 5399:40:30       | 260.00        | 0.800 | 1.050 | 1.140 | 1.200 | 1.160 | 1.150                           | 1.000 | 0.500 | 0      | 0      | 0      |
| 5             | 10594: 8:43      | 260.00        | 0.800 | 1.050 | 1.140 | 1.200 | 1.160 | 1.150                           | 1.000 | 0.500 | 0      | 0      | 0      |
| 6             | 10999: 8:43      | 300.00        | 0.800 | 1.050 | 1.140 | 1.200 | 1.160 | 1.150                           | 1.000 | 0.500 | 0      | 0      | 0      |
| 7             | 15847:26:11      | 300.00        | 0.800 | 1.050 | 1.140 | 1.200 | 1.160 | 1.150                           | 1.000 | 0.500 | 0      | 0      | 0      |
| 8             | 15852:26:11      | 280.00        | 0.800 | 1.050 | 1.140 | 1.200 | 1.160 | 1.150                           | 1.000 | 0.500 | 0      | 0      | 0      |
| 9             | 21046:51:19      | 280.00        | 0.800 | 1.050 | 1.140 | 1.200 | 1.160 | 1.150                           | 1.000 | 0.500 | 0      | 0      | 0      |
| 10            | 21051:51:19      | 0.10          | 0.800 | 1.050 | 1.140 | 1.200 | 1.160 | 1.150                           | 1.000 | 0.500 | 0      | 0      | 0      |
| 11            | 21052:51:19      | 0.10          | 0.800 | 1.050 | 1.140 | 1.200 | 1.160 | 1.150                           | 1.000 | 0.500 | 0      | 0      | 0      |

履歴データ  
(IPRINT(5)=1 で出力)

## \*\*\*\*\* HISTORY DATA (1) \*\*\*\*\*

タイムステップ番号、時間、燃焼度、出力  
冷却材温度、冷却材圧力、冷却材流速、高速  
中性子束、火力オプション、プリントオプシ  
ヨン、定常非定常のマニュアルオプション

タイムステップ毎の熱的結果  
(PRINT(6)=1 で出力)

タイムステップ番号、時刻、  
冷却材温度、冷却材圧力

線出力、燃焼度、ギヤップコンタクタンス(全、  
ガス、固体、輻射)、温度(ペレット中心、表  
面、被覆管内面、外面)、片側ギヤップ幅、接  
触圧力、

ペレット内面対外面出力密度比、出力分布の指  
数、燃焼度、ペレット変位(熱膨張、スウェリ  
ング)、やきしまり、リロケーション、総合)、  
被覆管変位(熱膨張、弹性、クリープ、総合)

被覆管健全相-酸化膜間温度、被覆管表面温度、  
冷却材温度、酸化膜成長速度、酸化膜厚

初期ガスマル数  
軸方向セグメント毎のFPガス放出率  
燃料棒平均FPガス放出率  
燃料棒内圧、燃料棒体積(ギヤップ部、プレ  
ナム部)全ガスマル数、ヨウ素濃度(平均、  
最大)生成ガス、放出ガス、燃料棒内方スの  
モル数

\*\*\*\*\* OUTPUT — STAGE— 108 \*\*\*\*\* IFEM = 4 \*\*\*\*  
\*\*\*\*\* ROD AVERAGE FUSION GAS = 0.1971 \*\*\*\*\*

\*\*\*\*\* THERMAL ANALYSIS INFORMATION \*\*\*\*\*  
STAGE NO. 108  
TIME 21046.86 HR  
COOLANT TEMPERATURE 276.85 DEG. C  
COOLANT PRESSURE 7.00E+00 MPa

| SEQ. | L.H.R.<br>(W/CM) | BURN UP<br>(MWD/TU02) | GAP CONDUCTANCE<br>(W/CM**2 K) | TEMPERATURE (C)             | CLEARANCE<br>(MICRONS)  | CONTACT<br>FORCE (MPA)   |
|------|------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 8    | 140.000          | 13221.7               | TOTAL GAS SOLID RAD.           | PC PS CI CS                 | 291.5 311.5 333.5 329.2 | 21.160 0.000 0.000 0.000 |
| 7    | 280.000          | 28433.4               | 0.0869 0.0800 0.0089           | 1154.4 786.5 572.0 624.8    | 1.138 0.000 0.000 0.000 |                          |
| 6    | 322.000          | 30409.9               | 0.3452 0.3285 0.0108           | 1222.0 1526.1 1529.9 1614.9 | 0.000 0.000 0.000 0.000 |                          |
| 5    | 324.800          | 30674.3               | 0.3318 0.3248 0.0004           | 1222.0 1526.1 1529.9 1614.9 | 0.000 0.000 0.000 0.000 |                          |
| * 4  | 336.000          | 31132.0               | 0.3257 0.3185 0.0002           | 1614.9 632.9 340.3 342.0    | 0.024 0.000 0.000 0.000 |                          |
| * 3  | 319.200          | 30145.4               | 0.3235 0.3160 0.0003           | 1614.9 632.9 340.3 339.4    | 0.038 0.000 0.000 0.000 |                          |
| 2    | 294.000          | 27765.5               | 0.3186 0.3113 0.0004           | 1530.2 633.4 335.6 329.2    | 0.041 0.000 0.000 0.000 |                          |
| 1    | 224.000          | 21154.7               | 0.3161 0.3072 0.0024           | 1399.8 608.9 335.6 329.2    | 0.257 0.000 0.000 0.000 |                          |
|      |                  |                       | 0.2104 0.2036 0.0000           | 1222.6 638.7 324.9 291.8    | 0.900 0.000 0.000 0.000 |                          |

| SEG. | CSFR* | PFAIC* | BURN UP<br>(F ISS/CC<br>*10**20) | PELLET DISPLACEMENT (MICRONS)                             | CLADDING DISPLACEMENT (MICRONS)                           |
|------|-------|--------|----------------------------------|---|---|
| 8    | 0.875 | 2.0000 | 3.71                             | IRRAD. CREEP, THERMAL EXPANS., CATION SHELL, ATION CEMENT | DISPLACEMENT (MICRONS)<br>THERMAL, ELASTIC, CREEP, CEMENT |
| 7    | 0.875 | 2.0000 | 7.41                             | 42.54 0.00 -8.77 16.37                                    | 0.96 1.61 -8.20 -5.63                                     |
| 6    | 0.875 | 2.0000 | 8.53                             | 43.42 -8.73 37.15 17.01                                   | 1.41 1.62 -18.94 -15.93                                   |
|      |       |        |                                  | -37.14 -17.67 47.49 17.01                                 | -23.16 -20.00   |
|      |       |        |                                  | 55.67 -39.13 -39.13 17.01                                 | -23.46 -20.29   |
| 5    | 0.875 | 2.0000 | 8.60                             | 60.67 -46.67 -46.67 17.01                                 | 1.55 1.62 -24.59 -21.36                                   |
| * 4  | 0.875 | 2.0000 | 8.60                             | 56.12 -37.50 -37.50 17.01                                 | 1.59 1.62 -22.90 -19.76                                   |
| * 3  | 0.875 | 2.0000 | 8.45                             | 49.29 -23.88 -23.88 17.01                                 | 1.53 1.62 -20.34 -17.27                                   |
| 2    | 0.875 | 2.0000 | 7.79                             | 41.54 0.00 -17.67 29.56 17.01                             | 1.45 1.62 -14.51 -11.67                                   |
| 1    | 0.875 | 2.0000 | 5.93                             |   | 1.23 1.61   |

| SEG. | ZB-ZBX INT.<br>TEMP. (C) | CLAD SURFACE<br>TEMP. (C) | COOLANT<br>TEMP. (C) | CLAD OUTER CORROSION<br>RATE (M/MONTH) | CLAD THICKNESS (MICRON) |
|------|--------------------------|---------------------------|----------------------|--|-------------------------|
| PL   | 286.8                    | 286.8                     | 284.8                | 6.211E-04                              | 5.50921                 |
| 8    | 291.7                    | 291.0                     | 284.8                | 7.088E-04                              | 1.68713                 |
| 7    | 293.5                    | 292.2                     | 284.8                | 7.362E-04                              | 1.73547                 |
|      |                          |                           |                      |  | 1.74773                 |
| 6    | 294.0                    | 292.5                     | 284.8                | 7.435E-04                              | 1.74850                 |
|      |                          |                           |                      |  | 1.75157                 |
| 5    | 294.0                    | 292.5                     | 284.8                | 7.439E-04                              | 1.74868                 |
| * 4  | 294.0                    | 292.6                     | 284.8                | 7.459E-04                              | 1.74868                 |
| * 3  | 294.0                    | 292.5                     | 284.8                | 7.432E-04                              | 1.74868                 |
| 2    | 293.7                    | 292.1                     | 284.8                | 7.391E-04                              | 1.74868                 |
| 1    | 292.9                    | 291.8                     | 284.8                | 7.271E-04                              | 1.74867                 |
|      |                          |                           | = 1.898E-03          |  | 1.74867                 |

## FISSION GAS RESULT

| LOCAL FISSION GAS RELEASE FRACTION (AXIAL NODE)                                   | ROD AVERAGE FISSION GAS = 0.1971 | FRACTIONS OF GAS MIXTURE (PERCENT) | AXIAL NODE         |
|---|----------------------------------|------------------------------------|--------------------|
| 1.000681 2.0 1.0781 1.0 24856 4.0 29011 5.0 25894 6.0 24219 7.0 10867 8.0 0.01496 |                                  | 1 2 3 4                            | 5 6 7 8            |
| RELEASE FRACTION  |                                  |                                    |                    |
| ROD GAS PRESSURE (MPA) = 3.533 HE   | 3.533 HE                         | 4.6 4.5 4.5                        | 5.0 5.6 6.5        |
| FREE SPACE VOLUME (CM3) = 35.540 N2   | 35.540 N2                        | 0.0 0.0 0.0                        | 0.0 0.0 0.0        |
| (GAS, PLenum) = 4.260 KR  | 31.280 KR                        | 12.4 12.4 12.4                     | 12.3 12.2 12.1     |
| TOTAL GAS (MOL) = 2.550-02 HE   | 2.550-02 HE                      | 83.0 83.0 83.1                     | 82.6 82.1 81.4     |
| RELEASED MOLE (MOL) = 1.05D-04 (AVERAGE)  | N2                               | 1.85D-04 (PEAK)                    | 1.85D-04 TOTAL     |
| PRODUCED GAS . . . . .  | 0.00D+00                         | 1.55D-02                           | 1.04D-01 . . . . . |
| RELEASED GAS . . . . .  | 0.00D+00                         | 3.07D-03                           | 2.05D-02 . . . . . |
| ROD GAS . . . . .   | 1.8BD-03                         | 0.00D+00                           | 2.36E-02 . . . . . |
|   |                                  |                                    | 2.55E-02           |

RADIAL TEMPERATURE DISTRIBUTION AT AXIAL SEG. OF 4 ( NODAL POINT TEMPERATURE (DEG. C) )  
 PELLET  
 1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8. 9. 10. 11. / GAP / CLAD.  
 1615 1603 1568 1511 1432 1333 1216 1085 944 796 647 342 317 294

== OPTIONAL OUTPUT (IN ELEMENT AVERAGE) ==

| TEMPERATURE DISTRIBUTION IN THE FUEL (DEG. C) |   |         |         |         |         |         |         |         |         | IWTHE= 1 |        |
|---|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|--------|
| SEG   | 8 | 1152.44 | 1144.48 | 1128.63 | 1105.04 | 1073.94 | 1035.62 | 990.46  | 938.93  | 881.57   | 819.02 |
|   | 7 | 1287.95 | 1270.68 | 1238.48 | 1186.06 | 1041.24 | 950.15  | 849.42  | 741.50  | 629.02   |        |
|   | 6 | 1520.88 | 1498.97 | 1455.90 | 1392.27 | 1299.38 | 1209.15 | 1094.19 | 961.68  | 833.23   | 694.63 |
|   | 5 | 1544.31 | 1522.26 | 1478.51 | 1413.82 | 1329.30 | 1227.51 | 1110.48 | 981.70  | 844.86   | 703.88 |
|   | 4 | 1609.05 | 1585.84 | 1539.74 | 1471.50 | 1392.40 | 1274.50 | 1190.67 | 1014.47 | 870.01   | 721.57 |
|   | 3 | 1524.75 | 1503.20 | 1480.47 | 1397.31 | 1315.00 | 1215.41 | 1101.11 | 975.22  | 841.29   |        |
|   | 2 | 1395.08 | 1376.11 | 1338.54 | 1283.09 | 1210.91 | 1123.62 | 1023.34 | 912.57  | 794.18   | 671.18 |
|   | 1 | 1209.27 | 1196.03 | 1169.77 | 1130.93 | 980.16  | 1018.35 | 946.62  | 866.31  | 778.94   | 666.21 |

GAP GAS INFORMATION (%)

| GAP GAS INFORMATION (%) |   |     |     |      |      |  |  |  |  | IWTHE= 2 |  |
|-------------------------|---|-----|-----|------|------|--|--|--|--|----------|--|
| SEG                     | 8 | HE  | N2  | KR   | XE   |  |  |  |  |          |  |
|                         | 7 | 7.3 | 0.0 | 12.1 | 80.7 |  |  |  |  |          |  |
|                         | 6 | 6.5 | 0.0 | 12.2 | 81.4 |  |  |  |  |          |  |
|                         | 5 | 5.6 | 0.0 | 12.3 | 82.1 |  |  |  |  |          |  |
|                         | 4 | 5.0 | 0.0 | 12.3 | 82.6 |  |  |  |  |          |  |
|                         | 3 | 4.7 | 0.0 | 12.4 | 83.0 |  |  |  |  |          |  |
|                         | 2 | 4.5 | 0.0 | 12.4 | 83.1 |  |  |  |  |          |  |
|                         | 1 | 4.6 | 0.0 | 12.4 | 83.0 |  |  |  |  |          |  |

RADIUS OF GRAIN (MICRON)

| RADIUS OF GRAIN (MICRON) |   |       |       |      |      |      |      |      |      | IWTHE= 3 |      |
|--------------------------|---|-------|-------|------|------|------|------|------|------|----------|------|
| SEG                      | 8 | 5.00  | 5.00  | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00     | 5.00 |
|                          | 7 | 5.23  | 5.03  | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00     | 5.00 |
|                          | 6 | 9.39  | 8.90  | 7.96 | 6.67 | 5.18 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00     | 5.00 |
|                          | 5 | 10.00 | 9.49  | 8.51 | 7.15 | 5.55 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00     | 5.00 |
|                          | 4 | 11.60 | 11.03 | 9.93 | 8.39 | 6.56 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00     | 5.00 |
|                          | 3 | 9.66  | 9.17  | 8.23 | 6.92 | 5.39 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00     | 5.00 |
|                          | 2 | 6.97  | 6.60  | 5.88 | 5.03 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00     | 5.00 |
|                          | 1 | 5.07  | 5.00  | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00 | 5.00     | 5.00 |

RADIUS OF INTRAGRANULAR GAS BUBBLE (ANGSTROM)

| RADIUS OF INTRAGRANULAR GAS BUBBLE (ANGSTROM) |   |       |       |       |       |       |       |      |      | IWTHE= 4 |      |
|---|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|----------|------|
| SEG   | 8 | 5.67  | 5.49  | 5.14  | 4.61  | 3.93  | 3.22  | 2.75 | 2.58 | 2.54     |      |
|   | 7 | 8.98  | 8.07  | 8.48  | 7.60  | 6.10  | 4.34  | 3.43 | 3.32 | 3.34     |      |
|   | 6 | 12.53 | 12.17 | 11.46 | 10.40 | 10.78 | 9.39  | 5.86 | 3.74 | 3.53     | 3.56 |
|   | 5 | 13.00 | 12.66 | 11.93 | 10.85 | 10.87 | 11.97 | 6.45 | 3.83 | 3.55     | 3.57 |
|   | 4 | 14.16 | 13.83 | 13.14 | 11.97 | 11.28 | 11.06 | 7.89 | 4.21 | 3.61     | 3.62 |

着目セグメントの径方向温度分布  
以下 IWTHE(i)により指定した項目を出力

ペレット内温度分布

ペレット粒径

粒内ガスバブル半径

| DENSITY OF INTRAGRANULAR GAS BUBBLE (BUBBLES/CM**3) |       |       |       |       |       |       |      |      |      | IWHE= 5 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|---------|
| SEG   | 3     | 12.68 | 12.33 | 11.62 | 10.55 | 10.75 | 9.70 | 6.25 | 3.77 | 3.52    |
| 2   | 10.11 | 9.79  | 9.44  | 8.46  | 7.55  | 6.20  | 4.62 | 3.27 | 3.44 | 3.40    |
| 1   | 9.11  | 8.92  | 8.46  |       |       |       |      |      | 3.04 | 3.05    |
|   |       |       |       |       |       |       |      |      |      | 3.08    |

| DIFFUSION COEFFICIENT (CM**2/SEC) |           |           |           |           |           |           |           |           |           | IWHE= 6   |
|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| SEG                               | 8         | 7.882D+17 | 8.062D+17 | 8.444D+17 | 9.063D+17 | 9.980D+17 | 1.108D+18 | 1.190D+18 | 1.222D+18 | 1.232D+18 |
| 7                                 | 5.374D+17 | 5.433D+17 | 5.665D+17 | 6.246D+17 | 7.464D+17 | 9.415D+17 | 1.072D+18 | 1.091D+18 | 1.098D+18 | 1.080D+18 |
| 6                                 | 3.939D+17 | 3.913D+17 | 4.630D+17 | 5.149D+17 | 5.149D+17 | 5.149D+17 | 7.690D+17 | 1.011D+18 | 1.050D+18 | 1.053D+18 |
| 5                                 | 3.659D+17 | 3.710D+17 | 4.023D+17 | 4.451D+17 | 4.442D+17 | 4.272D+17 | 4.846D+17 | 7.152D+17 | 1.054D+18 | 1.051D+18 |
| 4                                 | 3.315D+17 | 3.408D+17 | 4.613D+17 | 4.008D+17 | 4.008D+17 | 4.356D+17 | 6.050D+17 | 9.590D+17 | 1.045D+18 | 1.043D+18 |
| 3                                 | 3.761D+17 | 3.881D+17 | 4.142D+17 | 4.582D+17 | 4.493D+17 | 4.985D+17 | 7.332D+17 | 1.021D+18 | 1.058D+18 | 1.055D+18 |
| 2                                 | 4.785D+17 | 4.943D+17 | 5.121D+17 | 4.868D+17 | 5.291D+17 | 6.876D+17 | 9.563D+17 | 1.072D+18 | 1.077D+18 | 1.073D+18 |
| 1                                 | 5.302D+17 | 5.405D+17 | 5.681D+17 | 6.281D+17 | 7.317D+17 | 9.050D+17 | 1.100D+18 | 1.138D+18 | 1.136D+18 | 1.132D+18 |

| EFFECTIVE DIFFUSION COEFFICIENT (CM**2/SEC) |           |           |           |           |           |           |           |           |           | IWHE= 7   |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| SEG   | 8         | 1.639D-16 | 1.455D-16 | 1.148D-16 | 8.156D-17 | 5.413D-17 | 3.588D-17 | 2.607D-17 | 2.186D-17 | 2.044D-17 |
| 7   | 1.258D-15 | 9.818D-16 | 5.939D-16 | 2.763D-16 | 1.025D-16 | 3.793D-17 | 2.245D-17 | 2.019D-17 | 2.001D-17 | 2.000D-17 |
| 6   | 2.310D-14 | 1.833D-14 | 1.119D-14 | 5.159D-15 | 1.721D-15 | 3.985D-16 | 7.616D-17 | 2.374D-17 | 2.012D-17 | 2.000D-17 |
| 5   | 3.019D-14 | 2.381D-14 | 1.461D-14 | 6.782D-15 | 2.273D-15 | 5.289D-16 | 9.016D-17 | 2.517D-17 | 2.017D-17 | 2.000D-17 |
| 4   | 5.854D-14 | 4.631D-14 | 2.868D-14 | 1.345D-14 | 4.562D-15 | 1.053D-15 | 1.832D-16 | 3.051D-17 | 2.033D-17 | 2.000D-17 |
| 3   | 3.445D-14 | 1.925D-14 | 1.186D-14 | 5.898D-15 | 1.086D-15 | 4.043D-16 | 7.894D-17 | 2.447D-17 | 2.040D-17 | 2.000D-17 |
| 2   | 5.314D-15 | 4.174D-15 | 2.547D-15 | 1.181D-15 | 4.068D-16 | 1.079D-16 | 3.253D-17 | 2.059D-17 | 2.044D-17 | 2.003D-17 |
| 1   | 3.856D-16 | 3.184D-16 | 2.129D-16 | 1.182D-16 | 5.833D-17 | 3.103D-17 | 2.222D-17 | 2.029D-17 | 2.005D-17 | 2.005D-17 |

| NUMBER OF GAS ATOMS IN A GRAIN (ATOMS) |           |           |           |           |           |           |           |           |           | IWHE= 8   |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| SEG                                    | 8         | 1.538D-16 | 1.372D-16 | 1.094D-16 | 7.879D-17 | 5.286D-17 | 3.531D-17 | 2.578D-17 | 2.165D-17 | 2.026D-17 |
| 7                                      | 9.175D-16 | 7.597D-16 | 5.017D-16 | 2.529D-16 | 9.888D-17 | 3.737D-17 | 2.223D-17 | 2.000D-17 | 1.983D-17 | 1.982D-17 |
| 6                                      | 4.060D-15 | 3.716D-15 | 2.130D-15 | 2.225D-15 | 1.209D-15 | 5.822D-16 | 6.955D-17 | 3.349D-17 | 1.994D-17 | 1.992D-17 |
| 5                                      | 4.350D-15 | 4.056D-15 | 3.412D-15 | 2.552D-15 | 1.405D-15 | 4.835D-16 | 8.721D-17 | 2.489D-17 | 1.995D-17 | 1.993D-17 |
| 4                                      | 5.155D-15 | 4.897D-15 | 4.349D-15 | 3.412D-15 | 2.250D-15 | 8.412D-16 | 1.549D-16 | 3.010D-17 | 1.993D-17 | 1.993D-17 |
| 3                                      | 4.003D-15 | 3.803D-15 | 3.278D-15 | 2.303D-15 | 1.278D-15 | 5.663D-16 | 7.563D-17 | 2.420D-17 | 1.987D-17 | 1.982D-17 |
| 2                                      | 2.215D-15 | 1.953D-15 | 1.444D-15 | 8.973D-16 | 3.638D-16 | 1.039D-16 | 3.208D-17 | 2.089D-17 | 1.986D-17 | 1.982D-17 |
| 1                                      | 3.499D-16 | 2.909D-16 | 1.397D-16 | 1.137D-16 | 5.706D-17 | 3.063D-17 | 2.203D-17 | 2.011D-17 | 1.984D-17 | 1.982D-17 |

| NUMBER OF GAS ATOMS IN A BOUNDARY (ATOMS) |           |           |           |           |           |           |           |           |           | NUMBER OF GAS ATOMS RELEASED TO FREE VOLUME (ATOMS) |           |           |           |           |           |           |           |           |           | NUMBER OF GAS ATOMS IN A GRAIN AND BOUNDARY (ATOMS) |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|   |           |           |           |           | WTHE= 9   |           |           |           |           | WTHE= 10  |           |           |           |           | WTHE= 11  |           |           |           |           | WTHE= 12  |           |           |           |           | WTHE= 13  |           |           |           |           |           |           |
| SEG                                       | 4.6110+09 | 4.6370+09 | 4.6890+09 | 4.2840+09 | 3.2020+09 | 2.2400+09 | 1.7150+09 | 1.5050+09 | 1.4460+09 | 1.4550+09   | 7.9100+09 | 8.0130+09 | 2.8010+09 | 2.8350+09 | 2.8890+09 | 2.8350+09 | 2.8890+09 | 2.8350+09 | 2.8890+09 | 2.8350+09   | 2.8890+09 | 2.8350+09 | 2.8890+09 | 2.8350+09 | 2.8890+09 | 2.8350+09 | 2.8890+09 | 2.8350+09 | 2.8890+09 |           |           |
| 8   | 4.6070+09 | 4.3030+09 | 4.3530+09 | 4.5050+09 | 4.7150+09 | 4.4580+09 | 4.4300+09 | 4.4300+09 | 4.4300+09 | 4.4300+09   | 7.0100+09 | 7.0100+09 | 4.8110+09 | 3.5910+09 | 3.2760+09 | 3.2760+09 | 3.2760+09 | 3.2760+09 | 3.2760+09 | 3.2760+09   | 3.2760+09 | 3.2760+09 | 3.2760+09 | 3.2760+09 | 3.2760+09 | 3.2760+09 | 3.2760+09 | 3.2760+09 | 3.2760+09 | 3.2760+09 |           |
| 7   | 4.2900+10 | 4.1740+10 | 9.6340+09 | 7.0100+09 | 4.4580+09 | 4.4300+09 | 4.4300+09 | 4.4300+09 | 4.4300+09 | 4.4300+09   | 3.7510+09 | 3.7510+09 | 4.7540+09 | 4.6150+09 | 4.4220+09 | 3.4480+09 | 3.4790+09 | 3.4790+09 | 3.4790+09 | 3.4790+09   | 3.4790+09 | 3.4790+09 | 3.4790+09 | 3.4790+09 | 3.4790+09 | 3.4790+09 | 3.4790+09 | 3.4790+09 | 3.4790+09 | 3.4790+09 | 3.4790+09 |
| 6   | 1.2900+10 | 1.1740+10 | 9.6340+09 | 7.0100+09 | 4.4580+09 | 4.4300+09 | 4.4300+09 | 4.4300+09 | 4.4300+09 | 4.4300+09   | 3.7510+09 | 3.7510+09 | 4.7540+09 | 4.6150+09 | 4.4220+09 | 3.4480+09 | 3.4790+09 | 3.4790+09 | 3.4790+09 | 3.4790+09   | 3.4790+09 | 3.4790+09 | 3.4790+09 | 3.4790+09 | 3.4790+09 | 3.4790+09 | 3.4790+09 | 3.4790+09 | 3.4790+09 | 3.4790+09 |           |
| 5   | 1.4500+10 | 1.3170+10 | 7.9650+09 | 6.0100+09 | 4.4580+09 | 4.4300+09 | 4.4300+09 | 4.4300+09 | 4.4300+09 | 4.4300+09   | 3.7510+09 | 3.7510+09 | 4.7540+09 | 4.6150+09 | 4.4220+09 | 3.4480+09 | 3.4790+09 | 3.4790+09 | 3.4790+09 | 3.4790+09   | 3.4790+09 | 3.4790+09 | 3.4790+09 | 3.4790+09 | 3.4790+09 | 3.4790+09 | 3.4790+09 | 3.4790+09 | 3.4790+09 | 3.4790+09 |           |
| 4   | 1.8790+10 | 1.7200+10 | 1.4590+10 | 1.0610+10 | 6.8340+09 | 6.8340+09 | 6.8340+09 | 6.8340+09 | 6.8340+09 | 6.8340+09   | 4.1100+09 | 4.1100+09 | 4.7860+09 | 4.7860+09 | 4.2510+09 | 3.2510+09 | 3.2510+09 | 3.2510+09 | 3.2510+09 | 3.2510+09   | 3.2510+09 | 3.2510+09 | 3.2510+09 | 3.2510+09 | 3.2510+09 | 3.2510+09 | 3.2510+09 | 3.2510+09 | 3.2510+09 | 3.2510+09 | 3.2510+09 |
| 3   | 1.3650+10 | 1.2440+10 | 1.2440+10 | 8.2340+11 | 5.0590+11 | 2.3870+11 | 2.3870+11 | 2.3870+11 | 2.3870+11 | 2.3870+11   | 8.5130+10 | 8.5130+10 | 3.4580+10 | 1.5960+08 | 0.0000+00 | 0.0000+00 | 0.0000+00 | 0.0000+00 | 0.0000+00 | 0.0000+00   | 0.0000+00 | 0.0000+00 | 0.0000+00 | 0.0000+00 | 0.0000+00 | 0.0000+00 | 0.0000+00 | 0.0000+00 | 0.0000+00 | 0.0000+00 |           |
| 2   | 7.6560+09 | 6.9340+09 | 5.6390+09 | 4.2670+09 | 4.4260+09 | 4.4260+09 | 4.4260+09 | 4.4260+09 | 4.4260+09 | 4.4260+09   | 2.9310+09 | 2.9310+09 | 2.4100+09 | 2.4100+09 | 2.2610+09 | 2.2610+09 | 2.2610+09 | 2.2610+09 | 2.2610+09 | 2.2610+09   | 2.2610+09 | 2.2610+09 | 2.2610+09 | 2.2610+09 | 2.2610+09 | 2.2610+09 | 2.2610+09 | 2.2610+09 | 2.2610+09 | 2.2610+09 |           |
| 1   | 4.5660+09 | 4.4740+09 | 4.5550+09 | 4.6740+09 | 4.6740+09 | 4.6740+09 | 4.6740+09 | 4.6740+09 | 4.6740+09 | 4.6740+09   | 2.9310+09 | 2.9310+09 | 2.4100+09 | 2.4100+09 | 2.2610+09 | 2.2610+09 | 2.2610+09 | 2.2610+09 | 2.2610+09 | 2.2610+09   | 2.2610+09 | 2.2610+09 | 2.2610+09 | 2.2610+09 | 2.2610+09 | 2.2610+09 | 2.2610+09 | 2.2610+09 | 2.2610+09 | 2.2610+09 |           |

粒界での FP ガス原子数

放出された FP ガス原子数

粒内、粒界の FP ガス原子数の和

粒内、粒界、放出された FP ガス原子数の和

生成した FP ガス原子数

| FISSION GAS RELEASE RATE IN A RING (%) |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| WTHE = 14                              |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| SEG                                    |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| 8                                      |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| 7                                      | 1.248D+11 | 1.110D+11 | 1.059D+11 | 1.104D+11 | 1.108D+11 | 1.120D+11 | 1.135D+11 | 1.153D+11 | 1.175D+11 | 1.190D+11 | 1.226D+11 |
| 6                                      | 8.298D+11 | 7.080D+11 | 6.434D+11 | 7.302D+11 | 7.340D+11 | 7.326D+11 | 7.326D+11 | 7.326D+11 | 7.351D+11 | 7.410D+11 | 7.410D+11 |
| 5                                      | 1.011D+12 | 8.664D+11 | 6.286D+11 | 3.762D+11 | 1.774D+11 | 1.774D+11 | 1.317D+11 | 1.338D+11 | 1.363D+11 | 1.391D+11 | 1.422D+11 |
| 4                                      | 1.633D+12 | 1.493D+12 | 1.023D+12 | 6.292D+11 | 3.099D+11 | 1.292D+11 | 1.362D+11 | 1.384D+11 | 1.409D+11 | 1.439D+11 | 1.472D+11 |
| 3                                      | 8.971D+11 | 7.691D+11 | 5.945D+11 | 1.294D+11 | 1.597D+11 | 1.294D+11 | 1.294D+11 | 1.315D+11 | 1.339D+11 | 1.367D+11 | 1.398D+11 |
| 2                                      | 3.101D+11 | 2.335D+11 | 1.877D+11 | 1.182D+11 | 1.162D+11 | 1.192D+11 | 1.192D+11 | 1.211D+11 | 1.233D+11 | 1.253D+11 | 1.288D+11 |
| 1                                      | 9.089D+10 | 8.740D+10 | 8.789D+10 | 8.662D+10 | 8.959D+10 | 9.081D+10 | 9.226D+10 | 9.397D+10 | 9.591D+10 | 9.810D+10 | 9.810D+10 |

| SATURATION DENSITY OF GAS ATOMS IN A BOUNDARY (ATOMS/CM**2) |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| WTHE = 15   |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| SEG   |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| 8   |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| 7   | 1.468D+15 | 1.476D+15 | 1.493D+15 | 1.493D+15 | 1.364D+15 | 1.019D+15 | 7.131D+14 | 5.460D+14 | 4.789D+14 | 4.604D+14 | 4.631D+14 |
| 6   | 1.340D+15 | 1.355D+15 | 1.386D+15 | 1.386D+15 | 1.434D+15 | 1.501D+15 | 1.354D+15 | 9.590D+14 | 8.916D+14 | 9.024D+14 | 9.227D+14 |
| 5   | 1.150D+15 | 1.180D+15 | 1.209D+15 | 1.209D+15 | 1.255D+15 | 1.321D+15 | 1.410D+15 | 1.531D+15 | 1.435D+15 | 1.043D+15 | 1.061D+15 |
| 4   | 1.111D+15 | 1.124D+15 | 1.164D+15 | 1.193D+15 | 1.239D+15 | 1.290D+15 | 1.361D+15 | 1.510D+15 | 1.196D+15 | 1.070D+15 | 1.070D+15 |
| 3   | 1.163D+15 | 1.253D+15 | 1.266D+15 | 1.266D+15 | 1.251D+15 | 1.251D+15 | 1.263D+15 | 1.469D+15 | 1.408D+15 | 1.038D+15 | 1.038D+15 |
| 2   | 1.253D+15 | 1.288D+15 | 1.297D+15 | 1.297D+15 | 1.261D+15 | 1.316D+15 | 1.404D+15 | 1.520D+15 | 1.508D+15 | 1.052D+15 | 1.052D+15 |
| 1   | 1.412D+15 | 1.424D+15 | 1.450D+15 | 1.450D+15 | 1.488D+15 | 1.254D+15 | 1.491D+15 | 1.520D+15 | 9.628D+14 | 9.487D+14 | 9.689D+14 |

| EXTERNAL STRESS IN A BOUNDARY (MPA) |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| WTHE = 16                           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| SEG                                 |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| 8                                   |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| 7                                   | 1.360D+15 | 1.355D+15 | 1.386D+15 | 1.386D+15 | 1.434D+15 | 1.501D+15 | 1.354D+15 | 9.590D+15 | 8.916D+15 | 9.024D+15 | 9.227D+15 |
| 6                                   | 1.165D+15 | 1.180D+15 | 1.209D+15 | 1.209D+15 | 1.255D+15 | 1.321D+15 | 1.410D+15 | 1.531D+15 | 1.435D+15 | 1.043D+15 | 1.061D+15 |
| 5                                   | 1.150D+15 | 1.164D+15 | 1.193D+15 | 1.193D+15 | 1.239D+15 | 1.290D+15 | 1.361D+15 | 1.510D+15 | 1.196D+15 | 1.070D+15 | 1.070D+15 |
| 4                                   | 1.111D+15 | 1.124D+15 | 1.164D+15 | 1.193D+15 | 1.239D+15 | 1.290D+15 | 1.361D+15 | 1.469D+15 | 1.408D+15 | 1.038D+15 | 1.038D+15 |
| 3                                   | 1.163D+15 | 1.253D+15 | 1.266D+15 | 1.266D+15 | 1.251D+15 | 1.251D+15 | 1.263D+15 | 1.469D+15 | 1.508D+15 | 1.052D+15 | 1.052D+15 |
| 2                                   | 1.253D+15 | 1.288D+15 | 1.297D+15 | 1.297D+15 | 1.261D+15 | 1.316D+15 | 1.404D+15 | 1.520D+15 | 1.508D+15 | 1.052D+15 | 1.052D+15 |
| 1                                   | 1.412D+15 | 1.424D+15 | 1.450D+15 | 1.450D+15 | 1.488D+15 | 1.254D+15 | 1.491D+15 | 1.520D+15 | 9.628D+14 | 9.487D+14 | 9.689D+14 |

粒界で許容される最大 FP ガス密度

粒界に対する外部からの圧力

| BURNUP DISTRIBUTION IN THE FUEL (WWD/T) |         |         |         |         |         |         | IWTH= 18 |         |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|
| 1                                       | 3.53    | 3.53    | 3.53    | 3.53    | 3.53    | 3.53    | 3.53     | 3.53    |
| 2                                       | 29465.6 | 29547.8 | 29712.2 | 29858.8 | 30287.6 | 30698.6 | 31191.8  | 31767.1 |
| 3                                       | 32080.4 | 32256.9 | 32438.6 | 32833.6 | 33229.6 | 33629.6 | 34030.3  | 34430.0 |
| 4                                       | 33164.9 | 33768.9 | 33956.8 | 34238.6 | 34614.4 | 35084.1 | 35561.7  | 36035.3 |
| 5                                       | 32552.4 | 32643.2 | 32824.9 | 33097.3 | 33450.5 | 33914.6 | 34459.5  | 35095.1 |
| 6                                       | 32271.8 | 32812.8 | 32812.1 | 33172.1 | 33622.2 | 34162.4 | 34792.6  | 35512.8 |
| 7                                       | 28062.4 | 28140.7 | 28297.3 | 28852.2 | 29236.7 | 29706.4 | 30254.4  | 30880.7 |
| 8                                       | 14031.2 | 14070.4 | 14148.7 | 14266.1 | 14422.6 | 14618.4 | 14953.2  | 15121.2 |

## 燃料の軸方向、径方向燃焼度分布

TIME (HR) = 21046.855 ROD GAS PRESS (MPA) = 3.533 COOLANT PRESS (MPA) = 7.000

各セグメントの  
セグメント番号、線出力、燃焼度、高速中性子  
束、高速中性子フルエンス、核分裂密度、  
冷却材温度、冷却材圧力  
(PRINT(7)=1 で出力)

タイムステップ毎の力学的結果  
(PRINT(7)=1 で出力)

| MECHANICAL ANALYSIS INFORMATION   |                    |                        |             |             |                                    |                                   | IWROD= 1                      |              |
|---|--------------------|------------------------|-------------|-------------|------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|--------------|
| OUTPUT STAGE NUMBER = 108   |                    |                        |             |             |                                    |                                   |                               |              |
| TIME (HR) = 21046.855 ROD GAS PRESS (MPA) = 3.533 COOLANT PRESS (MPA) = 7.000 |                    |                        |             |             |                                    |                                   |                               |              |
| SEG.  | L. H. R.<br>(W/CM) | BUR N U P<br>(WWD/TOU) | (WWD/TOU)   | (F ISS/CC)  | FAST NEUTRON FLUX<br>(N/CM**4/SEC) | FAST NEUTRON FLUENCE<br>(N/CM**2) | FISSION RATE<br>(FISS/CC/SEC) |              |
| 1   | 140.000            | 1.29440D+03            | 1.50000D+04 | 1.32217D+04 | 3.73494D+20                        | 3.33333D+13                       | 2.50562D+21                   | 4.95319D+12  |
| 2   | 280.000            | 2.588810D+03           | 3.00000D+04 | 2.84434D+04 | 7.46387D+20                        | 6.88661D+13                       | 5.05120D+21                   | 9.96262D+12  |
| 3   | 324.000            | 2.97713D+03            | 3.45000D+04 | 3.04089D+04 | 8.59035D+20                        | 7.66661D+13                       | 5.80893D+21                   | 1.38900D+13  |
| 4   | 336.000            | 3.00302D+03            | 3.48000D+04 | 3.06743D+04 | 8.66565D+20                        | 7.73333D+13                       | 5.85944D+21                   | 1.48700D+13  |
| 5   | 319.000            | 3.10657D+03            | 3.63000D+04 | 3.17320D+04 | 8.96365D+20                        | 8.00000D+13                       | 6.06149D+21                   | 1.88310D+13  |
| 6   | 294.000            | 2.71825D+03            | 3.42600D+04 | 3.01454D+04 | 8.51555D+20                        | 7.66000D+13                       | 5.75942D+21                   | 1.28900D+13  |
| 7   | 224.000            | 2.07105D+03            | 2.40000D+04 | 2.11547D+04 | 5.97590D+20                        | 7.00000D+13                       | 5.30381D+21                   | 7.922100D+12 |

STRESS (RADIAL) (MPA)

| SEGMENT NUM. | STRESS RADIAL (MPA) | IWROD= 1 |
|--------------|---------------------|----------|
| 0            | 0.0                 | 0.0      |
| 1            | -1.1                | -1.1     |
| 2            | -0.6                | -0.6     |
| 3            | -0.5                | -0.5     |
| 4            | -0.2                | -0.2     |
| 5            | -0.6                | -0.6     |
| 6            | -1.3                | -1.3     |
| 7            | 0.0                 | 0.0      |
| 8            | -6.2                | -7.0     |

STRESS RADIAL (MPA)

半径方向応力

| 周方向応力               |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |           |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| 軸方向応力               |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |           |
| IWROD= 2            |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |           |
| STRESS (HOOP) (MPA) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |           |
| SEGMENT NUM.        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |           |
| 8                   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.1       |
| 7                   | -1.1  | -1.1  | -1.1  | -1.1  | -1.1  | -1.1  | -1.1  | -1.1  | -1.1  | -1.1  | -1.1      |
| 6                   | -0.6  | -0.6  | -0.6  | -0.6  | -0.6  | -0.6  | -0.6  | -0.6  | -0.6  | -0.6  | -1.5      |
| 5                   | -0.5  | -0.5  | -0.5  | -0.5  | -0.5  | -0.5  | -0.5  | -0.5  | -0.5  | -0.5  | -1.6      |
| 4                   | -0.2  | -0.2  | -0.2  | -0.2  | -0.2  | -0.2  | -0.2  | -0.2  | -0.2  | -0.2  | -1.4      |
| 3                   | -0.6  | -0.6  | -0.6  | -0.6  | -0.6  | -0.6  | -0.6  | -0.6  | -0.6  | -0.6  | -1.4      |
| 2                   | -1.3  | -1.3  | -1.3  | -1.3  | -1.3  | -1.3  | -1.3  | -1.3  | -1.3  | -1.3  | -1.5      |
| 1                   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | -1.7      |
| 1                   | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | ELM. NUM. |
| SEGMENT NUM.        | 8     | 7     | 6     | 5     | 4     | 3     | 2     | 1     | 1     | 12    | 13        |
|                     | -28.5 | -29.0 | -26.9 | -26.9 | -21.2 | -21.3 | -11.9 | -36.0 | -36.2 | -25.2 | -19.1     |
|                     | -19.1 | -24.2 | -25.2 | -25.2 | -20.2 | -20.2 | -13.0 | -26.5 | -26.5 | -22.6 | -13.0     |
|                     | -20.2 | -25.2 | -25.2 | -25.2 | -22.6 | -22.6 | -33.0 | -26.3 | -26.3 | -20.3 | -33.0     |
|                     | -13.0 | -33.0 | -33.0 | -33.0 | -22.6 | -22.6 | -36.0 | -36.0 | -36.0 | -26.5 | -36.0     |
|                     | -33.0 | -33.0 | -33.0 | -33.0 | -22.6 | -22.6 | -36.0 | -36.0 | -36.0 | -22.6 | -36.0     |
|                     | -22.6 | -22.6 | -22.6 | -22.6 | -20.3 | -20.3 | -30.1 | -30.1 | -30.1 | -20.3 | -30.1     |
|                     | -20.3 | -20.3 | -20.3 | -20.3 | -17.1 | -17.1 | -30.1 | -30.1 | -30.1 | -17.1 | -30.1     |
|                     | -17.1 | -22.0 | -22.0 | -22.0 | -17.1 | -17.1 | -19.1 | -19.1 | -19.1 | -17.1 | -19.1     |
|                     | -22.0 | -30.3 | -30.3 | -30.3 | -27.1 | -27.1 | -30.2 | -30.2 | -30.2 | -27.1 | -30.2     |
|                     | -30.3 | -30.3 | -30.3 | -30.3 | -11   | -11   | -13   | -13   | -13   | -11   | -14       |
|                     | -11   | -12   | -13   | -13   | -1    | -1    | -2    | -2    | -2    | -1    | -1        |

| 周方向応力                |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |           |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| 軸方向応力                |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |           |
| IWROD= 3             |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |           |
| STRESS (AXIAL) (MPA) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |           |
| SEGMENT NUM.         |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |           |
| 8                    | -0.3  | -0.4  | -0.4  | -0.4  | -0.4  | -0.5  | -0.5  | -0.6  | -0.6  | -0.7  | -0.8      |
| 7                    | -1.1  | -1.1  | -1.1  | -1.1  | -1.1  | -1.1  | -1.1  | -1.0  | -1.0  | -1.0  | -1.0      |
| 6                    | -0.6  | -0.6  | -0.6  | -0.6  | -0.6  | -0.7  | -0.7  | -0.9  | -0.9  | -1.1  | -1.2      |
| 5                    | -0.5  | -0.5  | -0.5  | -0.5  | -0.5  | -0.5  | -0.5  | -0.5  | -0.5  | -1.1  | -1.3      |
| 4                    | -0.2  | -0.2  | -0.2  | -0.2  | -0.2  | -0.3  | -0.3  | -0.3  | -0.3  | -1.0  | -1.3      |
| 3                    | -0.5  | -0.5  | -0.5  | -0.5  | -0.5  | -0.6  | -0.6  | -0.7  | -0.8  | -1.1  | -1.3      |
| 2                    | -1.2  | -1.2  | -1.2  | -1.2  | -1.2  | -1.3  | -1.3  | -1.3  | -1.3  | -1.2  | -1.3      |
| 1                    | -0.1  | -0.2  | -0.2  | -0.2  | -0.3  | -0.4  | -0.4  | -0.5  | -0.6  | -0.8  | -1.0      |
| 1                    | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | ELM. NUM. |
| SEGMENT NUM.         | 8     | 7     | 6     | 5     | 4     | 3     | 2     | 1     | 1     | 12    | 13        |
|                      | -14.9 | -15.9 | -15.4 | -15.4 | -16.6 | -16.6 | -16.6 | -9.4  | -9.4  | -12.2 | -12.2     |
|                      | -12.2 | -15.9 | -15.4 | -15.4 | -16.6 | -16.6 | -16.6 | -9.4  | -9.4  | -12.1 | -12.1     |
|                      | -12.1 | -16.3 | -16.3 | -16.3 | -20.0 | -20.0 | -20.0 | -18.2 | -18.2 | -8.4  | -8.4      |
|                      | -8.4  | -19.9 | -19.9 | -19.9 | -18.6 | -18.6 | -18.6 | -18.3 | -18.3 | -12.8 | -12.8     |
|                      | -12.8 | -16.6 | -16.6 | -16.6 | -11   | -11   | -11   | -11   | -11   | -1    | -1        |

|    | EQU. STRESS (MPA) |           |
|----|-------------------|-----------|
| 3  | -12.2             | -16.3     |
| 2  | -11.7             | -15.6     |
| 1  | -13.9             | -16.7     |
| 11 | 12                | 13        |
|    |                   | ELM. NUM. |

| 相当応力         |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| IWROD= 4     |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
| SEGMENT NUM. |
| 8            | 0.3          | 0.4          | 0.4          | 0.4          | 0.5          | 0.5          | 0.6          | 0.6          | 0.8          |
| 7            | 0.3          | 0.3          | 0.3          | 0.3          | 0.3          | 0.3          | 0.3          | 0.3          | 0.3          |
| 6            | 0.1          | 0.1          | 0.1          | 0.1          | 0.2          | 0.2          | 0.5          | 0.5          | 0.6          |
| 5            | 0.1          | 0.1          | 0.1          | 0.1          | 0.1          | 0.2          | 0.4          | 0.5          | 0.7          |
| 4            | 0.1          | 0.1          | 0.1          | 0.1          | 0.1          | 0.1          | 0.6          | 0.6          | 0.7          |
| 3            | 0.1          | 0.1          | 0.1          | 0.1          | 0.1          | 0.2          | 0.4          | 0.5          | 0.8          |
| 2            | 0.3          | 0.3          | 0.3          | 0.3          | 0.3          | 0.4          | 0.5          | 0.5          | 0.6          |
| 1            | 0.2          | 0.2          | 0.2          | 0.2          | 0.3          | 0.4          | 0.4          | 0.5          | 0.7          |
| 11           | 2            | 3            | 4            | 5            | 6            | 7            | 8            | 9            | 10           |
|              |              |              |              |              |              |              |              |              | ELM. NUM.    |

| 降伏応力         |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| IWROD= 5     |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
| SEGMENT NUM. |
| 9            | 207.4        | 210.5        | 216.7        | 225.8        | 238.0        | 252.9        | 270.5        | 290.5        | 337.2        |
| 7            | 177.0        | 179.5        | 184.3        | 194.3        | 219.8        | 250.7        | 286.2        | 325.4        | 411.2        |
| 6            | 144.2        | 147.2        | 153.3        | 162.3        | 174.0        | 188.2        | 230.1        | 279.3        | 385.6        |
| 5            | 140.8        | 144.0        | 150.1        | 159.3        | 171.2        | 185.6        | 223.7        | 273.9        | 382.0        |
| 4            | 131.7        | 135.0        | 141.5        | 151.1        | 163.7        | 178.9        | 208.1        | 261.1        | 375.1        |
| 3            | 143.6        | 146.6        | 152.7        | 161.6        | 173.2        | 187.3        | 227.4        | 276.4        | 382.3        |
| 2            | 161.9        | 164.6        | 169.9        | 177.7        | 187.9        | 218.6        | 257.7        | 300.8        | 394.8        |
| 1            | 188.2        | 190.4        | 200.6        | 215.8        | 235.5        | 259.6        | 287.5        | 318.8        | 388.9        |
| 11           | 2            | 3            | 4            | 5            | 6            | 7            | 8            | 9            | 10           |
|              |              |              |              |              |              |              |              |              | ELM. NUM.    |

| YIELD STRESS (MPA) |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
|--------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| IWROD= 5           |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
| SEGMENT NUM.       | SEGMENT NUM. | SEGMENT NUM. | SEGMENT NUM. | SEGMENT NUM. | SEGMENT NUM. | SEGMENT NUM. | SEGMENT NUM. | SEGMENT NUM. | SEGMENT NUM. |
| 8                  | 459.5        | 461.6        | 454.5        | 454.5        | 454.5        | 454.5        | 454.5        | 454.5        | 454.5        |
| 7                  | 457.0        | 461.3        | 455.3        | 455.3        | 455.3        | 455.3        | 455.3        | 455.3        | 455.3        |
| 6                  | 455.8        | 460.8        | 455.1        | 455.1        | 455.1        | 455.1        | 455.1        | 455.1        | 455.1        |
| 5                  | 455.7        | 460.7        | 455.0        | 455.0        | 455.0        | 455.0        | 455.0        | 455.0        | 455.0        |
| 4                  | 455.4        | 460.6        | 455.0        | 455.0        | 455.0        | 455.0        | 455.0        | 455.0        | 455.0        |
| 3                  | 455.9        | 460.6        | 455.1        | 455.1        | 455.1        | 455.1        | 455.1        | 455.1        | 455.1        |
| 2                  | 456.6        | 461.1        | 455.2        | 455.2        | 455.2        | 455.2        | 455.2        | 455.2        | 455.2        |
| 1                  | 458.4        | 461.8        | 455.4        | 455.4        | 455.4        | 455.4        | 455.4        | 455.4        | 455.4        |
| 11                 | 12           | 13           | 14           | 14           | 14           | 14           | 14           | 14           | 14           |
|                    |              |              |              |              |              |              |              |              | ELM. NUM.    |

## CREEP STRAIN (RADIAL) (0.01%)

INR00= 6

| SEGMENT NUM. | 25.9   | 24.6   | 22.1  | 18.3  | 13.4  | 7.5   | 0.9  | -6.5  | -14.6 | -22.9     |
|--------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-----------|
|              | 44.8   | 44.8   | 41.3  | 35.0  | 23.0  | 13.0  | 1.4  | -12.2 | -26.1 | -39.2     |
| 6            | -287.1 | -159.0 | -6.0  | 78.1  | 58.2  | 23.5  | -7.1 | -31.9 | -53.5 |           |
| 5            | -404.0 | -230.7 | -22.7 | 94.8  | 107.1 | 77.7  | 36.9 | 2.4   | -26.4 | -50.6     |
| 4            | -624.5 | -363.2 | -48.6 | 132.3 | 162.6 | 128.7 | 77.0 | 32.2  | -10.6 | -39.6     |
| 3            | -299.8 | -168.0 | -9.8  | 78.6  | 85.4  | 62.1  | 25.6 | -5.0  | -30.0 | -51.9     |
| 2            | -12.4  | 7.4    | 26.8  | 32.9  | 21.2  | 8.4   | -7.1 | -24.2 | -40.5 | -54.9     |
| 1            | 41.5   | 39.8   | 36.6  | 31.5  | 22.5  | 13.5  | 3.5  | -7.0  | -19.0 | -30.8     |
|              | 1      | 2      | 3     | 4     | 5     | 6     | 7    | 8     | 9     | 10        |
|              |        |        |       |       |       |       |      |       |       | ELM. NUM. |

## CREEP STRAIN (HOOP) (0.01%)

INR00= 7

| SEGMENT NUM. | 25.9   | 26.2   | 26.8   | 27.7   | 28.8   | 30.0  | 31.3  | 32.7  | 34.1 | 35.2      |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|------|-----------|
|              | 44.8   | 45.0   | 47.8   | 50.9   | 54.9   | 57.3  | 59.8  | 62.5  | 64.4 | 65.7      |
| 6            | -287.1 | -242.1 | -174.6 | -108.0 | -55.6  | -19.4 | 4.4   | 20.9  | 31.7 |           |
| 5            | -404.0 | -344.5 | -534.0 | -165.5 | -96.4  | -48.3 | -17.3 | 3.6   | 18.0 | 39.2      |
| 4            | -624.5 | -535.5 | -398.4 | -263.8 | -159.9 | -93.5 | -46.5 | -15.6 | 4.4  | 17.8      |
| 3            | -299.8 | -253.8 | -183.8 | -114.4 | -59.9  | -23.3 | 2.3   | 19.0  | 29.9 |           |
| 2            | -12.4  | -6.1   | 6.8    | 20.2   | 32.2   | 39.4  | 45.4  | 50.5  | 53.9 | 56.0      |
| 1            | 41.5   | 42.5   | 43.9   | 45.7   | 48.1   | 49.6  | 51.7  | 53.7  | 55.5 | 56.9      |
|              | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6     | 7     | 8     | 9    | 10        |
|              |        |        |        |        |        |       |       |       |      | ELM. NUM. |

## 径方向クリープひずみ

## 周方向クリープひずみ

| CREEP STRAIN(AXIAL) (0.01%) |        |        |       |       |       |       |       |       |       |       |           |
|-----------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| IWROD= 8                    |        |        |       |       |       |       |       |       |       |       |           |
| SEGMENT NUM.                | 8      | -54.9  | -53.8 | -51.6 | -48.3 | -44.1 | -38.9 | -33.2 | -26.7 | -19.8 | -12.4     |
| 7                           | -106.7 | -104.3 | -99.8 | -93.6 | -83.6 | -74.6 | -64.2 | -51.9 | -39.4 | -19.8 | -12.4     |
| 6                           | -98.0  | -94.4  | -87.5 | -77.7 | -63.5 | -53.6 | -37.2 | -20.3 | -4.2  | -11.3 | -11.3     |
| 5                           | -93.2  | -89.5  | -82.3 | -71.9 | -56.9 | -46.9 | -30.1 | -13.4 | 3.3   | 19.4  | 19.4      |
| 4                           | -104.3 | -99.5  | -89.9 | -78.1 | -66.7 | -56.9 | -42.2 | -25.0 | 0.5   | 17.9  | 17.9      |
| 3                           | -98.2  | -94.6  | -87.7 | -77.8 | -63.9 | -54.0 | -37.1 | -20.5 | -4.4  | 11.3  | 11.3      |
| 2                           | -95.7  | -92.9  | -87.4 | -79.6 | -66.8 | -56.4 | -44.4 | -30.5 | -16.2 | -3.0  | -3.0      |
| 1                           | -91.7  | -90.0  | -86.9 | -82.0 | -74.3 | -65.9 | -57.1 | -47.7 | -37.1 | -26.7 | -26.7     |
|                             | 1      | 2      | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | ELM. NUM. |

| HARD STRAIN(EOL.) (0.01%) |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |           |
|---------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----------|
| IWROD= 9                  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |           |
| SEGMENT NUM.              | 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 | 0.0       |
| 6                         | 0.0 | 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 | 0.0       |
| 4                         | 0.0 | 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 | 0.0       |
| 2                         | 0.0 | 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 | 0.0       |
|                           | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | ELM. NUM. |

| PLAST. STRAIN(EOL.) (0.01%) |   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |           |
|-----------------------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----------|
| IWROD= 10                   |   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |           |
| SEGMENT NUM.                | 8 | 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. |

軸方向クリープひずみ

クリープ硬化ひずみ

相当塑性ひずみ

| スケルプト |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| スケルプト |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

| スケルプト |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| スケルプト |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| スケルプト |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| スケルプト |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| スケルプト |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

| スケルプト |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| スケルプト |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| スケルプト |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| スケルプト |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| スケルプト |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

| スケルプト |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| スケルプト |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| スケルプト |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

## TOTAL STRAIN(RADIAL) (0.01%)

WROD= 12

| SEGMENT NUM. | 141.6  | 139.2 | 134.5 | 127.6 | 118.5 | 107.6 | 95.3  | 81.6  | 66.5  | 50.8      |
|--------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| 8            | 227.1  | 224.7 | 217.8 | 204.3 | 193.6 | 183.5 | 163.2 | 140.5 | 114.5 | 88.3      |
| 7            | -53.7  | 70.1  | 215.4 | 292.4 | 286.0 | 248.3 | 198.7 | 151.8 | 110.2 | 63.0      |
| 6            | -162.9 | 6.5   | 208.5 | 318.8 | 319.2 | 276.6 | 220.8 | 169.5 | 123.8 | 83.6      |
| 5            | -362.0 | -104  | 202.1 | 373.9 | 390.9 | 342.5 | 274.5 | 213.2 | 151.6 | 104.9     |
| 4            | -65.0  | 62.6  | 214.2 | 294.0 | 289.5 | 253.4 | 202.1 | 155.0 | 113.3 | 75.5      |
| 3            | 2      | 189.7 | 209.0 | 223.6 | 221.4 | 199.5 | 174.9 | 146.5 | 115.6 | 85.3      |
| 2            | 196.9  | 193.6 | 186.8 | 176.3 | 160.4 | 143.5 | 124.5 | 104.2 | 82.0  | 59.9      |
| 1            | 1      | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9         |
|              |        |       |       |       |       |       |       |       |       | ELM. NUM. |

## 径方向ひずみ

## TOTAL STRAIN(WROP) (0.01%)

WROD= 13

| SEGMENT NUM. | 141.6  | 140.8  | 139.2  | 138.9 | 133.8 | 129.0 | 125.7 | 120.7 | 115.2 | 109.2     |
|--------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| 8            | 227.1  | 226.4  | 214.6  | 220.5 | 214.6 | 207.1 | 195.6 | 169.1 | 178.8 | 167.9     |
| 7            | -53.7  | -12.4  | 49.6   | 108.0 | 148.3 | 163.9 | 178.1 | 177.7 | 172.2 | 163.7     |
| 6            | -162.9 | -106.4 | -20.9  | 60.4  | 117.9 | 150.6 | 165.7 | 169.6 | 166.9 | 160.3     |
| 5            | -362.0 | -276.1 | -146.1 | -22.1 | 67.8  | 122.1 | 150.1 | 163.2 | 165.5 | 161.5     |
| 4            | 3      | -65.0  | -22.4  | 41.9  | 102.5 | 144.8 | 167.7 | 176.9 | 177.1 | 163.9     |
| 3            | 2      | 189.7  | 196.2  | 204.2 | 209.5 | 209.7 | 205.8 | 198.7 | 189.7 | 167.6     |
| 2            | 1      | 196.9  | 195.8  | 193.6 | 190.1 | 185.3 | 179.2 | 172.3 | 164.6 | 147.2     |
| 1            | 1      | 2      | 3      | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10        |
|              |        |        |        |       |       |       |       |       |       | ELM. NUM. |

## 周方向ひずみ

| TOTAL STRAIN(AXIAL) (0.0%) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | IWROD= 14   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |    |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|
| ! SEGMENT NUM.             |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | ! ELM. NUM. |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |    |
| 8                          | 88.1  | 88.1  | 88.1  | 88.1  | 88.1  | 88.1  | 88.1  | 88.1  | 88.1  | 88.1  | 88.1  | 88.1        | 88.1  | 88.1  | 88.1  | 88.1  | 88.1  | 88.1  | 88.1  | 88.1  | 88.1  | 88.1  |    |
| 7                          | 103.4 | 103.4 | 103.4 | 103.4 | 103.4 | 103.4 | 103.4 | 103.4 | 103.4 | 103.4 | 103.4 | 103.4       | 103.4 | 103.4 | 103.4 | 103.4 | 103.4 | 103.4 | 103.4 | 103.4 | 103.4 | 103.4 |    |
| 6                          | 163.4 | 163.4 | 163.4 | 163.4 | 163.4 | 163.4 | 163.4 | 163.4 | 163.4 | 163.4 | 163.4 | 163.4       | 163.4 | 163.4 | 163.4 | 163.4 | 163.4 | 163.4 | 163.4 | 163.4 | 163.4 | 163.4 |    |
| 5                          | 178.7 | 178.7 | 178.7 | 178.7 | 178.7 | 178.7 | 178.7 | 178.7 | 178.7 | 178.7 | 178.7 | 178.7       | 178.7 | 178.7 | 178.7 | 178.7 | 178.7 | 178.7 | 178.7 | 178.7 | 178.7 | 178.7 |    |
| 4                          | 184.3 | 184.3 | 184.3 | 184.3 | 184.3 | 184.3 | 184.3 | 184.3 | 184.3 | 184.3 | 184.3 | 184.3       | 184.3 | 184.3 | 184.3 | 184.3 | 184.3 | 184.3 | 184.3 | 184.3 | 184.3 | 184.3 |    |
| 3                          | 164.2 | 164.2 | 164.2 | 164.2 | 164.2 | 164.2 | 164.2 | 164.2 | 164.2 | 164.2 | 164.2 | 164.2       | 164.2 | 164.2 | 164.2 | 164.2 | 164.2 | 164.2 | 164.2 | 164.2 | 164.2 | 164.2 |    |
| 2                          | 137.3 | 137.3 | 137.3 | 137.3 | 137.3 | 137.3 | 137.3 | 137.3 | 137.3 | 137.3 | 137.3 | 137.3       | 137.3 | 137.3 | 137.3 | 137.3 | 137.3 | 137.3 | 137.3 | 137.3 | 137.3 | 137.3 |    |
| 1                          | 90.1  | 90.1  | 90.1  | 90.1  | 90.1  | 90.1  | 90.1  | 90.1  | 90.1  | 90.1  | 90.1  | 90.1        | 90.1  | 90.1  | 90.1  | 90.1  | 90.1  | 90.1  | 90.1  | 90.1  | 90.1  | 90.1  |    |
|                            | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12          | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    | 19    | 20    | 21    | 22    | 23 |

| TEMPERATURE (DEG C) |        |        |        |        |        |        |        |        |       |       |       | IWROD= 16   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |    |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|
| ! SEGMENT NUM.      |        |        |        |        |        |        |        |        |       |       |       | ! ELM. NUM. |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |    |
| 8                   | 1152.4 | 1144.5 | 1128.6 | 1105.6 | 1073.9 | 1035.6 | 990.5  | 938.9  | 901.6 | 881.6 | 819.0 | 819.0       | 819.0 | 819.0 | 819.0 | 819.0 | 819.0 | 819.0 | 819.0 | 819.0 | 819.0 | 819.0 |    |
| 7                   | 1297.9 | 1270.7 | 1226.5 | 1186.1 | 1120.5 | 1041.2 | 950.1  | 849.4  | 741.5 | 629.0 | 629.0 | 629.0       | 629.0 | 629.0 | 629.0 | 629.0 | 629.0 | 629.0 | 629.0 | 629.0 | 629.0 | 629.0 |    |
| 6                   | 1520.7 | 1499.0 | 1455.9 | 1392.3 | 1309.4 | 1209.1 | 1094.2 | 967.7  | 933.2 | 894.6 | 894.6 | 894.6       | 894.6 | 894.6 | 894.6 | 894.6 | 894.6 | 894.6 | 894.6 | 894.6 | 894.6 | 894.6 |    |
| 5                   | 1544.3 | 1522.0 | 1478.5 | 1413.8 | 1329.5 | 1227.5 | 1110.5 | 981.1  | 870.9 | 741.6 | 741.6 | 741.6       | 741.6 | 741.6 | 741.6 | 741.6 | 741.6 | 741.6 | 741.6 | 741.6 | 741.6 | 741.6 |    |
| 4                   | 1609.0 | 1585.8 | 1539.7 | 1471.5 | 1382.4 | 1274.5 | 1150.7 | 1014.5 | 870.0 | 721.6 | 721.6 | 721.6       | 721.6 | 721.6 | 721.6 | 721.6 | 721.6 | 721.6 | 721.6 | 721.6 | 721.6 | 721.6 |    |
| 3                   | 1524.7 | 1503.2 | 1460.5 | 1397.3 | 1315.0 | 1215.4 | 1101.1 | 975.2  | 841.3 | 703.1 | 703.1 | 703.1       | 703.1 | 703.1 | 703.1 | 703.1 | 703.1 | 703.1 | 703.1 | 703.1 | 703.1 | 703.1 |    |
| 2                   | 1355.7 | 1376.1 | 1338.5 | 1283.1 | 1230.9 | 1123.3 | 1023.3 | 912.6  | 794.2 | 671.2 | 671.2 | 671.2       | 671.2 | 671.2 | 671.2 | 671.2 | 671.2 | 671.2 | 671.2 | 671.2 | 671.2 | 671.2 |    |
| 1                   | 1209.3 | 1196.0 | 1169.8 | 1130.9 | 1060.2 | 1018.3 | 946.6  | 866.3  | 778.9 | 696.2 | 696.2 | 696.2       | 696.2 | 696.2 | 696.2 | 696.2 | 696.2 | 696.2 | 696.2 | 696.2 | 696.2 | 696.2 |    |
|                     | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9     | 10    | 11    | 12          | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    | 19    | 20    | 21    | 22    | 23 |

| THERMAL STRAIN(RADIAL) (0.0%) |       |       |       |       |       |       |       |      |      |      |      | IWROD= 15   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----|
| ! SEGMENT NUM.                |       |       |       |       |       |       |       |      |      |      |      | ! ELM. NUM. |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |
| 8                             | 116.6 | 115.6 | 113.4 | 110.3 | 106.2 | 101.3 | 95.5  | 89.1 | 82.2 | 74.9 | 74.9 | 74.9        | 74.9 | 74.9 | 74.9 | 74.9 | 74.9 | 74.9 | 74.9 | 74.9 | 74.9 | 74.9 |    |
| 7                             | 135.5 | 133.0 | 128.2 | 121.4 | 112.4 | 102.0 | 90.5  | 78.4 | 66.1 | 53.9 | 53.9 | 53.9        | 53.9 | 53.9 | 53.9 | 53.9 | 53.9 | 53.9 | 53.9 | 53.9 | 53.9 | 53.9 |    |
| 6                             | 170.5 | 167.1 | 160.4 | 150.8 | 138.6 | 124.4 | 106.9 | 92.7 | 76.5 | 60.9 | 60.9 | 60.9        | 60.9 | 60.9 | 60.9 | 60.9 | 60.9 | 60.9 | 60.9 | 60.9 | 60.9 | 60.9 |    |
| 5                             | 174.2 | 170.7 | 163.9 | 154.0 | 141.5 | 127.0 | 111.0 | 94.4 | 77.9 | 61.9 | 61.9 | 61.9        | 61.9 | 61.9 | 61.9 | 61.9 | 61.9 | 61.9 | 61.9 | 61.9 | 61.9 | 61.9 |    |
|                               | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8    | 9    | 10   | 11   | 12          | 13   | 14   | 15   | 16   | 17   | 18   | 19   | 20   | 21   | 22   | 23 |



ベレット、被覆管の各部に働く圧力

セグメント番号、接觸状態、径軸方向圧力  
被覆管径軸方向圧力

ノード点変位

|                |                | PRESSURE ON UPPER AND SIDE SURFACE (MPA) |        |          |        | DISPLACEMENT OF NODES (MICRON) |         |        |         |
|----------------|----------------|--|--------|----------|--------|--------------------------------|---------|--------|---------|
| SEGMENT NUMBER | CONTACT STATUS | PELLET                                   |        | CLADDING |        | RADIAL                         |         | AXIAL  |         |
|                |                | RADIAL                                   | AXIAL  | RADIAL   | AXIAL  | RADIAL                         | AXIAL   | RADIAL | AXIAL   |
| 8              | OPEN           | 0.000                                    | -0.595 | -1.120   | -0.027 | 3.533                          | -15.387 | 4.676  | -14.101 |
| 7              | SLIP           | -0.983                                   | -0.987 | -0.920   | -0.962 | 4.497                          | -14.288 | 4.430  | -14.357 |
| 6              | SLIP           | -0.920                                   | -0.920 | -0.687   | -0.817 | 4.201                          | -14.170 | 4.477  | -14.311 |
| 5              | FIXED          | -0.964                                   | -0.980 | -1.486   | -1.188 | 4.994                          | -13.323 | 3.532  | -15.387 |
| 4              | SLIP           | -0.984                                   | -0.980 | -1.486   | -1.188 | 4.994                          | -13.323 | 3.532  | -15.387 |
| 3              | SLIP           | -0.986                                   | -0.980 | -1.486   | -1.188 | 4.994                          | -13.323 | 3.532  | -15.387 |
| 2              | OPEN           | 0.000                                    | -0.594 | -1.120   | -0.027 | 3.533                          | -15.387 | 4.676  | -14.101 |
| 1              |                |  |        |          |        |                                |         |        |         |

|               |               | DISPLACEMENT OF NODES (MICRON) |       |          |       | PRESSURE ON SIDE SURFACE (MPA) |       |          |       |
|---------------|---------------|--------------------------------|-------|----------|-------|--------------------------------|-------|----------|-------|
| (R-DIRECTION) | (Z-DIRECTION) | PELLET                         |       | CLADDING |       | PELLET                         |       | CLADDING |       |
|               |               | RADIAL                         | AXIAL | RADIAL   | AXIAL | RADIAL                         | AXIAL | RADIAL   | AXIAL |
| 8             | 0.0           | 7.5                            | 14.9  | 22.0     | 28.8  | 35.1                           | 40.8  | 45.8     | 50.1  |
| 7             | 0.0           | 12.0                           | 24.0  | 35.5     | 46.3  | 56.1                           | 64.7  | 72.1     | 78.2  |
| 6             | -2.8          | 0.9                            | 12.3  | 27.8     | 42.9  | 56.1                           | 66.6  | 72.9     | 82.9  |
| 5             | 0.0           | -8.8                           | -8.3  | 2.8      | 19.7  | 36.6                           | 51.9  | 71.9     | 80.5  |
| 4             | 0.0           | -19.2                          | -24.7 | -14.0    | 5.8   | 26.5                           | 44.7  | 59.2     | 78.5  |
| 3             | 0.0           | -3.4                           | -0.1  | 11.2     | 26.8  | 42.2                           | 66.3  | 78.6     | 84.1  |
| 2             | 0.0           | 10.1                           | 21.1  | 33.0     | 44.7  | 55.3                           | 84.6  | 72.3     | 80.5  |
| 1             | 0.0           | 10.4                           | 20.7  | 30.8     | 39.9  | 48.4                           | 56.0  | 62.6     | 86.0  |

|               |               | DISPLACEMENT OF NODES (MICRON) |       |          |       | PRESSURE ON SIDE SURFACE (MPA) |       |          |       |
|---------------|---------------|--------------------------------|-------|----------|-------|--------------------------------|-------|----------|-------|
| (R-DIRECTION) | (Z-DIRECTION) | PELLET                         |       | CLADDING |       | PELLET                         |       | CLADDING |       |
|               |               | RADIAL                         | AXIAL | RADIAL   | AXIAL | RADIAL                         | AXIAL | RADIAL   | AXIAL |
| 8             | 3.1           | 4.4                            | 5.6   | 5.6      | 5.6   | 5.6                            | 5.6   | 5.6      | 5.6   |
| 7             | -3.8          | -1.9                           | -0.2  | -0.2     | -0.2  | -0.2                           | -0.2  | -0.2     | -0.2  |
| 6             | -5.6          | -3.5                           | -1.8  | -1.8     | -1.8  | -1.8                           | -1.8  | -1.8     | -1.8  |
| 5             | -7.1          | -4.9                           | -3.0  | -3.0     | -3.0  | -3.0                           | -3.0  | -3.0     | -3.0  |
| 4             | -5.9          | -3.7                           | -1.9  | -1.9     | -1.9  | -1.9                           | -1.9  | -1.9     | -1.9  |
| 3             | -5.5          | -3.4                           | -1.7  | -1.7     | -1.7  | -1.7                           | -1.7  | -1.7     | -1.7  |
| 2             | -4.0          | -2.0                           | -0.4  | -0.4     | -0.4  | -0.4                           | -0.4  | -0.4     | -0.4  |
| 1             | -1.1          | 0.5                            | 2.0   | 2.0      | 2.0   | 2.0                            | 2.0   | 2.0      | 2.0   |

着目セグメントについての熱的結果のまとめ  
(IPRINT(8)=1で出力)

## POWER HISTORY / THERMAL INFORMATION (SEGMENT NUMBER 4)

| THERMAL INFORMATION |         |          |                         |                 |                                     |                       |                          |                             |                   |                                 |   |
|---------------------|---------|----------|-------------------------|-----------------|-------------------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------------|-------------------|---------------------------------|---|
| POWER               | HISTORY | STEP NO. | LINEAR HEAT RATE (W/CM) | BURNUP (DEG. C) | TEMPERATURE OF FUEL CENTER (DEG. C) | CLAD SURFACE (DEG. C) | INNER INTERFACE (DEG. C) | CLAD CONDUCTANCE (W/CM2 /C) | GAP SIZE (CM2 /C) | RADIAL CONTACT PRESSURE (N/CM2) | PRODUCE FISSION GAS (10-5 GA/CM2) (SEC) |
| 50                  | 324.0   | 7933.0   | 1396.8                  | 566.4           | 339.5                               | 293.4                 | 292.5                    | 0.4216                      | 0.4156            | 0.0000                          | 11.08                                   |
| 68                  | 312.0   | 15866.0  | 1307.7                  | 529.1           | 338.0                               | 292.4                 | 292.4                    | 0.4816                      | 0.4762            | 0.0000                          | 0.69                                    |
| 89                  | 360.0   | 23799.0  | 1703.7                  | 657.5           | 345.4                               | 294.2                 | 292.7                    | 0.3405                      | 0.3327            | 0.0005                          | 0.05                                    |
| 108                 | 336.0   | 31732.0  | 1614.9                  | 646.9           | 342.0                               | 294.1                 | 292.6                    | 0.3235                      | 0.3160            | 0.0003                          | 0.04                                    |
| 143                 | 0.1     | 31735.9  | 20.8                    | 20.5            | 18.1                                | 18.1                  | 18.1                     | 0.0146                      | 0.0143            | 0.0000                          | 54.74                                   |

## RESULTS OF THERMAL ANALYSIS / MECHANICAL INFORMATION (SEGMENT NUMBER 4)

| FUEL - CLAD   |         |               |                  |                                  |                                 |                    |                  |                                 |                           |                                   |                             |
|---------------|---------|---------------|------------------|----------------------------------|---------------------------------|--------------------|------------------|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| POWER HISTORY | TIME    | LINEAR BURNUP | HEAT RATE (W/CM) | THermal CReep EXPAn -Sion (TU02) | DENSIfy SWELL -CATION -ING (HR) | RELOCA -TION (MIC) | RADIAL GAP (MIC) | RADIAL CONTACT PRESSURE (N/CM2) | ELASTIC EXPAN -SION (MIC) | Thermal Creep Defor -mation (MIC) | RADIAL DISPLA -CEMENT (MIC) |
| 50            | 5394.7  | 7933.0        | 324.0            | 47.8                             | 0.0                             | -17.7              | 14.4             | 17.0                            | 61.6                      | 11.1                              | 0.1                         |
| 68            | 10944.1 | 15866.0       | 312.0            | 42.9                             | 0.0                             | -17.7              | 24.3             | 17.0                            | 66.5                      | 0.7                               | 0.4                         |
| 89            | 15847.4 | 23799.0       | 360.0            | 65.2                             | -33.2                           | -17.7              | 34.1             | 17.0                            | 65.5                      | 0.0                               | 1.2                         |
| 108           | 21046.9 | 31732.0       | 336.0            | 60.7                             | -46.5                           | -17.7              | 50.4             | 17.0                            | 64.0                      | 0.0                               | 1.6                         |
| 143           | 21052.9 | 31735.9       | 0.1              | 0.1                              | -46.5                           | -17.7              | 56.0             | 17.0                            | 9.0                       | 54.7                              | 0.0                         |

着目セグメントについての力学的結果のまとめ  
(IPRINT(9)=1で出力)

タイムステップ番号、線出力、燃焼度  
温度（ペレット中心、ペレット表面、被覆管  
内面、被覆管酸化膜境界、被覆管外面）ギヤ  
ップコンダクタンス（全、気体、固体）片側  
ギヤップ幅、接触圧力、ガス生成量、方程式  
出率、ヨウ素濃度、計算時間についての履歴

着目セグメントについての力学的結果のまとめ  
(IPRINT(9)=1で出力)

タイムステップ番号、時間、線出力、燃焼度  
ペレット：熱膨張、クリープ、やきしまり、  
スクエーリング、リロケーション、全体の径方  
向変形量  
ペレット-被覆管：片側ギヤップ幅、圧力  
被覆管：熱膨張、弹性、クリープ、全体の徑  
方向変形量についての履歴出力

着目セグメントについてのFPガスのまとめ  
(IPRINT(10)=1で出力)

| FUEL - CLAD   |         |               |                   |                    |                             |                               |                        |                                  |   |                              |  |
|---------------|---------|---------------|-------------------|--------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------|----------------------------------|---|------------------------------|--|
| POWER HISTORY | TIME    | LINEAR BURNUP | FUEL TEMP. (W/CM) | GRAIN TEMP. (TU02) | FUEL DIFFUS. COEFF. (ANGST) | BUBBLE DIFFUS. COEFF. (10D17) | BUBBLE DENSITY (10D17) | SATURAT. DENS. AT. TEMP. (10D13) | LOCAL EFFECT BOUND. DENS. (10-16 CM2/S) | PER AT. DENS. (10D13 AT/CM2) | Xe+KR PERCENT RELEASE IN GAP (10-3 MOLE) |
| 50            | 5394.7  | 324.0         | 7933.0            | 1396.8             | 5.60                        | 8.54                          | 5.63                   | 49.3                             | 19.57                                   | 60.7                         | 49.24                                    |
| 68            | 10934.1 | 312.0         | 15866.0           | 1307.7             | 5.60                        | 8.54                          | 5.63                   | 15.2                             | 10.35                                   | 76.4                         | 6.72                                     |
| 89            | 15847.4 | 360.0         | 23799.0           | 1703.7             | 11.60                       | 12.11                         | 3.96                   | 1309.7                           | 44.74                                   | 90.9                         | 64.18                                    |
| 108           | 21046.9 | 336.0         | 31732.0           | 1614.9             | 11.60                       | 14.16                         | 3.31                   | 585.4                            | 51.55                                   | 111.1                        | 78.47                                    |
| 143           | 21052.9 | 0.1           | 31735.9           | 20.8               | 11.60                       | 14.16                         | 3.31                   | 0.2                              | 0.20                                    | 105.6                        | 323.5                                    |

燃料棒全体についてのFPガスの結果のまとめ  
(PRINT(11)=1で出力)

| POWER HISTORY / FUEL ROD |           |                         |                            |  |                  |                       |                                     |             |  |      |       |       |       |      |
|--------------------------|-----------|-------------------------|----------------------------|--|------------------|-----------------------|-------------------------------------|-------------|--|------|-------|-------|-------|------|
| STEP NO.                 | TIME (HR) | LINEAR HEAT RATE (W/CM) | BURNUP (WDO/TU02) (FSS/CC) | AMOUNT OF GAS PRODUCE RELEASE PLUMIN (X+KR) (100-3 MOLE) | GAP (100-3 MOLE) | TOTAL IN FUEL ROD (%) | FRACTION OF GAS MIXTURE HE (N2) (%) | KR (N2) (%) | FISSION GAS RELEASE PRESSURE (MPA) (%) |      |       |       |       |      |
| 50 5394.7                | 324.0     | 7933.0                  | 2.22                       | 29.84  | 1.29             | 0.39                  | 3.17                                | 59.21       | 0.00                                   | 5.30 | 35.49 | 4.33  | 0.41  |      |
| 68 10394.1               | 312.0     | 15866.0                 | 4.45                       | 59.67  | 5.39             | 6.71                  | 0.55                                | 7.26        | 25.83                                  | 0.00 | 9.64  | 64.53 | 9.03  | 0.97 |
| 89 15347.4               | 360.0     | 23799.0                 | 6.67                       | 89.51  | 17.37            | 17.95                 | 1.29                                | 19.25       | 9.74                                   | 0.00 | 11.73 | 78.52 | 19.41 | 2.66 |
| 108 21046.9              | 336.0     | 31732.0                 | 8.90                       | 119.34   | 23.60            | 23.74                 | 1.74                                | 25.47       | 7.36                                   | 0.00 | 12.04 | 80.59 | 19.77 | 3.53 |
| 143 21052.9              | 0.1       | 31735.9                 | 8.90                       | 119.36   | 23.60            | 20.05                 | 5.42                                | 25.47       | 7.36                                   | 0.00 | 12.04 | 80.59 | 19.77 | 1.44 |

RESULTS OF FEM MECHANICAL ANALYSIS / FUEL AND CLAD DEFORMATIONS (ANALYZED SEGMENT NUMBER 4)

| POWER HISTORY / TOP OF FUEL ! FUEL - CLAD AT TOP ! CLADDING |           |                         |                   |                         |                           |                      |                            |                             |                     |       |        |       |       |       |       |
|---|-----------|-------------------------|-------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| STEP NO.  | TIME (HR) | LINEAR HEAT RATE (W/CM) | BURNUP (WDO/TU02) | AXIAL DISPLACEMENT (MM) | RADIAL DISPLACEMENT (MIC) | CONTACT PRESS. (MPA) | AXIAL GAP AT SURFACE (MIC) | RADIAL GAP AT SURFACE (MIC) | RADIAL PRESS. (MPA) |       |        |       |       |       |       |
| 50 5394.7   | 324.0     | 7933.0                  | 10.60             | 10.60                   | 0.00                      | 50.19                | 34.14                      | -0.31                       | 11.18               | -1.90 | -1.90  | -3.11 | -0.04 | -0.04 |       |
| 68 10394.1  | 312.0     | 15866.0                 | 18.89             | 18.89                   | 0.00                      | 57.33                | 25.60                      | -0.31                       | 13.87               | -3.11 | -3.11  | -0.04 | -0.04 | -0.04 |       |
| 89 15347.4  | 360.0     | 23799.0                 | 28.11             | 28.11                   | 0.00                      | 86.17                | 0.00                       | -2.14                       | -3.36               | 15.34 | -17.37 | -1.88 | -3.37 | -3.37 | -3.37 |
| 108 21046.9   | 336.0     | 31732.0                 | 36.05             | 36.05                   | 0.00                      | 84.12                | 0.00                       | -0.82                       | -0.69               | 16.50 | -16.50 | -3.37 | -3.37 | -3.37 | -3.37 |
| 143 21052.9   | 0.1       | 31735.9                 | 38.97             | 38.97                   | 0.00                      | 50.57                | 32.63                      | -0.28                       | 0.00                | 16.50 | -16.50 | -3.37 | -3.37 | -3.37 | -3.37 |

RESULTS OF FEM MECHANICAL ANALYSIS / STRESSES AND STRAINS IN FUEL (ANALYZED SEGMENT NUMBER 4)

| POWER HISTORY / TOP AND INNER OF FUEL |           |                         |                   |                              |                            |                             |                      |                        |                     |      |      |      |      |      |      |
|---------------------------------------|-----------|-------------------------|-------------------|------------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------|------------------------|---------------------|------|------|------|------|------|------|
| STEP NO.                              | TIME (HR) | LINEAR HEAT RATE (W/CM) | BURNUP (WDO/TU02) | CIRCUM. TOTAL STRAIN (0.01%) | AXIAL TOTAL STRAIN (0.01%) | RADIAL TOTAL STRAIN (0.01%) | CREEP STRAIN (0.01%) | EQUIVA. STRAIN (0.01%) | RADIAL STRESS (MPA) |      |      |      |      |      |      |
| 50 5394.7                             | 324.0     | 7933.0                  | 171.              | 29                           | 171.                       | 34                          | -96.                 | 87.                    | 0                   | -0.1 | -0.1 | 0.0  | 0.1  | 0.1  | 0.0  |
| 68 10394.1                            | 312.0     | 15866.0                 | 177.              | 52                           | 177.                       | 34                          | -96.                 | 86.                    | 0                   | 0.1  | 0.1  | 0.0  | -1.3 | -1.3 | 0.3  |
| 89 15347.4                            | 360.0     | 23799.0                 | -8.               | -260.                        | -260.                      | -104.                       | -260.                | 104.                   | -260.               | -0.2 | -0.2 | -0.1 | -0.2 | -0.2 | -0.1 |
| 108 21046.9                           | 336.0     | 31732.0                 | -392.             | 98.                          | -392.                      | -104.                       | -625.                | 347.                   | -625.               | 14.0 | 22.8 | 14.0 | 8.8  | 8.8  | 8.8  |
| 143 21052.9                           | 0.1       | 31735.9                 | -481.             | 108                          | -481.                      | -104.                       | -625.                | 348.                   | -625.               | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

## RESULTS OF FEM MECHANICAL ANALYSIS / STRESSES AND STRAINS IN CLAD (ANALYZED SEGMENT NUMBER 4)

| POWER HISTORY |           |                         |                 |                 |               |               |                |               |               |                 |               |               |
|---------------|-----------|-------------------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|-----------------|---------------|---------------|
| STEP NO.      | TIME (HR) | LINEAR HEAT RATE (W/CM) | BURNUP (MW/DAY) | CLAD            |               |               | FUEL           |               |               | CLADDING        |               |               |
|               |           |                         |                 | CIRCUM. (0.01%) | AXIAL (0.01%) | TOTAL (0.01%) | RADIAL (0.01%) | AXIAL (0.01%) | TOTAL (0.01%) | CIRCUM. (0.01%) | AXIAL (0.01%) | TOTAL (0.01%) |
| 50            | 5394.7    | 324.0                   | 7933.0          | -5.8            | 217.8         | 48.0          | -25.1          | 0.2           | 24.9          | 28.8            | 0.0           | -44.4         |
| 68            | 10994.1   | 312.0                   | 15866.0         | -7.9            | 34.4          | 50.2          | -27.8          | 0.3           | 21.5          | 31.3            | 0.0           | -40.8         |
| 89            | 15847.4   | 360.0                   | 23795.0         | -2.8            | 38.1          | 48.0          | -25.8          | -1.3          | 27.0          | 30.5            | 0.0           | -13.3         |
| 108           | 21046.9   | 338.0                   | 31732.0         | -5.9            | 43.1          | 50.5          | -27.9          | -1.1          | 29.0          | 32.9            | 0.0           | -22.6         |
| 143           | 21052.9   | 0.1                     | 31735.9         | -8.0            | 40.9          | 42.3          | -27.9          | -1.1          | 29.0          | 32.9            | 0.0           | -20.1         |

## RESULTS OF FEM MECHANICAL ANALYSIS / FUEL AND CLAD DEFORMATIONS (WHOLE FUEL ROD) AND THERMAL ANALYSIS / FUEL FREE VOLUME AND CLADDING OXIDATION INFORMATION

| POWER HISTORY |           |                         |                 |            |              |             |                     |                    |                     |                     |                    |                         |                        |
|---------------|-----------|-------------------------|-----------------|------------|--------------|-------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------|--------------------|-------------------------|------------------------|
| STEP NO.      | TIME (HR) | LINEAR HEAT RATE (W/CM) | BURNUP (MW/DAY) | CLAD       |              |             | FUEL                |                    |                     | CLADDING            |                    |                         |                        |
|               |           |                         |                 | GE (CM**2) | E19N (CM**2) | DISP. (MIC) | CLAD. AXIAL (0.01%) | FUEL AXIAL (0.01%) | INNER DISP. (0.01%) | CLAD. AXIAL (0.01%) | FUEL AXIAL (0.01%) | FREE GAS PRESSURE (MPA) | PLUMON VOLUME (CM***3) |
| 50            | 5394.7    | 270.0                   | 7933.0          | 8999.6     | 155.4        | 0.7         | 72.3                | 27.8               | 0.409               | 38.219              | 32.597             | 0.984                   | 1.004                  |
| 68            | 10994.1   | 260.0                   | 15866.0         | 17999.3    | 316.6        | -1.1        | 82.8                | 34.4               | 0.367               | 26.912              | 32.309             | 1.332                   | 1.362                  |
| 89            | 15847.4   | 300.0                   | 23799.0         | 26998.9    | 456.4        | 1.7         | 134.1               | 38.1               | 2.658               | 35.745              | 31.260             | 1.537                   | 1.574                  |
| 108           | 21046.9   | 280.0                   | 31732.0         | 35998.5    | 606.1        | -0.3        | 138.7               | 43.1               | 3.533               | 35.540              | 31.260             | 1.709                   | 1.752                  |
| 143           | 21052.9   | 0.1                     | 31735.9         | 36002.9    | 606.3        | -3.0        | 86.5                | 40.9               | 1.438               | 43.005              | 33.840             | 1.709                   | 1.752                  |

着目セグメントの被覆管についてのひずみ  
応力、ひずみの結果のまとめ  
(IPRINT(14)=1で出力)

タイムステップ番号、時間、線出力、燃焼度  
被覆管内面での  
周、軸、径方向全ひずみ、  
周、軸、径方向クリープひずみ  
相当クリープひずみ、相当塑性ひずみ  
周、軸、径方向応力および相当応力

燃料棒全長についてのひずみおよび  
着目セグメントについての被覆管腐食計算の  
まとめ (IPRINT(19)=1で出力)

タイムステップ番号、時間、線出力、燃焼度、  
フルエンス  
被覆管直径変位、ペレット軸方向変位、被覆  
管軸方向変位  
平均酸化膜厚、最大酸化膜厚

## A6. サブルーチン機能

表A 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。

なお、表 A 2 中での略号は、以下の通りである。

- 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： 热的解析部分で用いるサブルーチン群
- 力学： 热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

表 A2 EXBURN-I サブルーチンリスト

| サブルーチン名   | 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 | 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           |   | ○ | ○   |
| CELMDF    | 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             |   |   | ○   |

表 A2 (続き)

| サブルーチン名 | 内 容   | 主 | 熱 | 力 学 |
|---------|---|---|---|-----|
| CHCAP   | 被覆管健全部 (金属相) 定容比熱                             |   | ○ |     |
| CHCAP1  | 被覆管酸化膜定容比熱                                    |   | ○ |     |
| 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                              |   |   | ○   |
| 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) 热伝導率                             |   | ○ |     |
| 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 ( $\bar{\varepsilon}^p$ 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  | $\bar{\varepsilon}^p$ における降伏曲面の大きさの収束計算       |   |   | ○   |
| FDIST   | ペレット径方向フラックスデプレッションの計算                        |   | ○ |     |
| FCREEP  | ペレットクリープひずみの計算(MATPRO-09)                     |   | ○ |     |
| FDISTF  | ペレット径方向フラックスデプレッションの計算                        |   | ○ |     |

表 A2 (続き)

| サブルーチン名 | 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 (Jens-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                          |   |   | ○   |
| GDTHCN  | 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 A2 (続き)

| サブルーチン名 | 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                    | ○ |   |     |
| 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 の式)    |   | ○ |     |
| 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    | メインプログラム                      | ○ |   |     |
| MATDAT  | 伝熱計算のための物性値セット                |   | ○ |     |

表 A2 (続き)

| サブルーチン名 | 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 | ○ |   |     |
| OPTSO2  | 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 A2 (続き)

| サブルーチン名 | 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  | UO <sub>2</sub> ペレット熱伝導率  |   | ○ |     |
| PTHEX   | ペレット熱膨張                   |   | ○ | ○   |
| PUTHCN  | MOX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  | 軸方向移流および拡散モデル             |   | ○ |     |
| 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    |   |   | ○   |
| RJMFGR  | 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               |   | ○ |     |
| SCNHAL  | 被覆管表面熱伝達係数 (Halden モデル)   |   | ○ |     |
| 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 (3 要素用)     |   | ○ |     |
| SOLVE2  | 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 A2 (続き)

| サブルーチン名 | 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   | ペレット融点の計算                              |   | ○ |     |
| TMSTP   | 全体解析用のタイムステップ幅の決定                      |   |   | ○   |
| TSUR2   | 被覆管表面温度 (Halden の経験式)                  |   | ○ |     |
| 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 (Chubb 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 $\dot{\varepsilon}^c$ の作成 |   |   | ○   |

表 A2 (続き)

| サブルーチン名 | 内 容  | 主 | 熱 | 力 学 |
|---------|--|---|---|-----|
| XCPEQ2  | 被覆管クリープの $\dot{\varepsilon} = f, \frac{\partial f}{\partial \sigma}, \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_H}$ の作成 (MATPRO-09)    |   |   | ○   |
| XCPHD2  | 被覆管クリープ $\dot{\varepsilon}_H (= g), \frac{\partial g}{\partial \sigma}, \frac{\partial g}{\partial \varepsilon^c}$ の作成 (MATPRO-09) |   |   | ○   |
| 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   |   |   | ○   |
| XEQEPPS | 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  |   |   | ○   |
| XPUGH   | 被覆管クリープ Pugh の反転   |   |   | ○   |

## A. 7 EXBURN-1サブルーチンツリー

