

JAERI-Data/Code
97-010



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

1997年3月

鈴木元衛・斎藤裕明*

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 いばらき印刷(株)

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

日本原子力研究所東海研究所原子炉安全工学部
鈴木 元衛・斎藤 裕明*

(1997年2月10日受理)

FEMAXI-IVは、軽水炉燃料のふるまい解析コードとして、前バージョンFEMAXI-IIIに多くの機能の追加・改良を実施した拡張バージョンである。本報告は、FEMAXI-IVの最初のバージョンを改良したVer. 2について、基本理論と構造、モデルと数値解法、採用した物性値を詳述したものである。FEMAXI-IV(Ver. 2)では、バグフィックスがされ、ペレット熱伝導率の更新および熱応力誘起FP放出モデルの追加がされた。さらに、本コードの有効かつ広範な利用を可能とするため、入出力の種類と方法を詳しく説明し、具体的なサンプル出力を添えた。

Description and User's Manual of Light Water Reactor
Fuel Analysis Code FEMAXI-IV(Ver. 2)

Motoe SUZUKI and Hiroaki SAITOU*

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

(Received February 10, 1997)

FEMAXI-IV is an advanced version of FEMAXI-III, the analysis code of light water reactor fuel behavior in which various functions and improvements have been incorporated. The present report describes in detail the basic theories and structure, the models and numerical solutions applied, and the material properties adopted in the version 2 which is an improved version of the first version of FEMAXI-IV. In FEMAXI-IV (Ver. 2), bugs have been fixed, pellet thermal conductivity properties have been updated, and thermal-stress-induced FP gas release model have been incorporated.

In order to facilitate effective and wide-ranging application of the code, types and methods of input/output of the code are also described, and a sample output in an actual form is included.

Keywords: LWR Fuel, FEM Analysis, Transient, Pellet, Cladding, FP Gas Release, PCMI,
Gap Conductance

* CRC Research Co.,

目 次

1. 序 言	1
1. 1 コードの概要	1
1. 2 コードの構造上の特徴	4
1. 3 Ver. 2 における改良点	6
2. 解析理論および機能	6
2. 1 热的ふるまい	6
2. 1. 1 温度分布	7
2. 1. 2 ギャップ熱伝達	26
2. 1. 3 接触力評価モデル	28
2. 1. 4 FPガス生成・放出	41
2. 1. 5 ギャップ内ガスの拡散・流動モデル	58
2. 1. 6 タイムステップの更新	69
2. 2 燃料棒全長での力学的ふるまい	71
2. 2. 1 有限要素モデル	71
2. 2. 2 基本式	76
2. 2. 3 ペレットクラック	79
2. 2. 4 クリープ	82
2. 2. 5 塑 性	86
2. 2. 6 剛性方程式の導出	90
2. 2. 7 ペレット及び被覆管に作用する外力及び接触力	93
2. 2. 8 境界条件	93
2. 2. 9 全体マトリックスの作成	97
2. 2. 10 上下プレナム境界条件	98
2. 2. 11 ペレットと被覆管の接触判定	101
2. 3 局所での力学的ふるまい	105
2. 3. 1 基本式	106
2. 3. 2 剌性方程式	108
2. 3. 3 境界条件	113
2. 4 物性値	124
2. 4. 1 ペレット物性値	124
2. 4. 2 ジルカロイ被覆管物性値	141
2. 4. 3 その他の物性値	147

参考文献	152
Appendix	155

Contents

1.	Introduction	1
1.1	Outline of the Code	1
1.2	Structural Characteristics of the Code	4
1.3	Improvements in Ver.2	6
2.	Analytical Theory and Functions	6
2.1	Thermal Behavior	6
2.1.1	Temperature Distribution	7
2.1.2	Gap Thermal Conduction	26
2.1.3	Contact-force Estimation Model	28
2.1.4	Generation and Release of FP Gas	41
2.1.5	Gas Diffusion in the Gap and Flow Model	58
2.1.6	Renewal of Time Step	69
2.2	Mechanical Behavior over Entire Length of Fuel Rod	71
2.2.1	Finite Element Model	71
2.2.2	Basic Equations	76
2.2.3	Pellet Crack	79
2.2.4	Creep	82
2.2.5	Plasticity	86
2.2.6	Stiffness Equation	90
2.2.7	External Force and Contact Force Acting on Pellet and Cladding	93
2.2.8	Boundary Conditions	93
2.2.9	Creation of Total Matrix	97
2.2.10	Boundary Conditions for Upper Plenum and Lower Plenum	98
2.2.11	Judgment of Contact between Pellet and Cladding	101
2.3	Local Mechanical Behavior	105
2.3.1	Basic Equations	106
2.3.2	Stiffness Equation	108
2.3.3	Boundary Conditions	113
2.4	Material Properties	124
2.4.1	Material Properties of Pellet	124
2.4.2	Material Properties of Zircaloy Cladding	141
2.4.3	Other Material Properties	147

References	152
Appendix	155

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、軽水炉燃料の信頼性確保は重要である。FEMAXI-IV コードは、燃料のふるまい解析コードとして、FEMAXI-III⁽¹⁾に多くの機能の追加・改良を実施した拡張バージョンである。また、本コードは HBEP 計画や Halden 炉、ZORITA 炉のデータ等を用いて検証が行なわれ、予測性能の確認および向上がはかられた^{(2),(3)}。

1.1 コードの概要

FEMAXI-IV は、軽水炉燃料の通常時及び過渡時における挙動を決定論的モデルにより解析するコードとして、温度分布や FP ガス放出時の熱的挙動を解析する部分と力学的挙動を解析する部分から構成されている。

熱的解析部は、温度分布を半径方向 1 次元軸対称問題として扱い、ペレット・被覆管のギャップ幅変化、FP 放出、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解析する。軸方向出力分布を扱うため燃料棒軸方向は最大 12 領域に分割され、熱的フィードバックが燃料棒全長にわたって収束するまで繰り返し計算されている。

力学的解析部は、燃料棒全長の解析と、1 ペレット長の解析のどちらかを選択できる。燃料棒全長解析では軸対称有限要素法(FEM)を燃料棒全長に、1 ペレット長の解析では軸対称有限要素法を半ペレット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、次にペレットの割れ、弾塑性およびクリープを考慮して剛性方程式を作成し、接触モードに対応する境界条件を仮定して剛性方程式を解くことにより、応力やひずみを計算する。

この解析では、割れペレットの弾性を未知量として含む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、ペレットの弾性 \leftrightarrow 塑性の状態変化が生じた時には、状態変化が生じた時刻以後について状態を改めて計算を行う。

燃料棒全長の解析では、軸方向全長を最大 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

素モデルを単純化し、全体自由度を削減している。

本コードで考慮されている現象を表 1.1 に示す。物性値は公開されているものをできる限り採用している。

また、Pu 入りの MOX 燃料および Gd 入りの燃料については、物性値を指定することにより解析が可能である。

表 1.1 FEMAXI-IV が扱う現象

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

本コードの主な特徴を以下に列挙する。

(1)要素特性

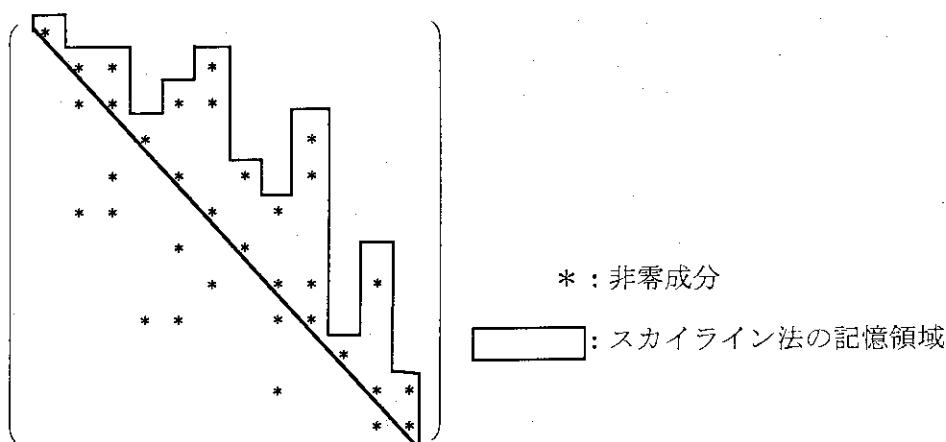
燃料全長にわたる力学計算を行うため、FEM 解析において四角形 3 自由度要素を導入し、計算領域、計算時間の短縮をはかっている。

(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、マトリクスの非ゼロ成分の記憶方式および処理手順を改良し、記憶容量および計算時間の削減をはかっている。スカイライン法では下図における実線内部だけを記憶する。FP ガス放出モデルにおいては、マトリクスの演算回数が最小になるように工夫している。



(4) 非平衡残差

非線形問題を解く場合、タイムステップ毎に生じる非平衡残差の累積を避けるため、平衡条件式を増分型で表わさず、荷重と応力の全体の釣り合いが満足されるような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。有限要素法では、ペレット、被覆管の各節点対について接触状態を判定し、それぞれのモードによって境界条件が設定される。

(6) 割れペレットの挙動

ペレットの割れは FEMAXI-III と同様に、剛性低下の方法で近似的に取り扱う。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、圧縮状態における剛性の回復をリロケーション量の関数として表している。

(7) FP 放出モデル

FP の放出機構には、等価球モデルを用いる。これにより、経験的モデルに比べ、実験データ範囲外での予測解析が可能である。

(8) ギャップ内ガス拡散流動モデル

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

(9) 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、及び FP 放出モデルの機構論的取り扱いにより、非定常時の燃料挙動を扱うことが可能である。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、解の精度向上と計算時間の短縮をはかっている。

(10) 計算の簡略化

FP 放出モデルでは、低温領域及び高温領域で同じ形式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、また特殊関数の使用をさけている。

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

1.2 コードの構造上の特徴

FEMAXI-IV コードは、図 1. 1 に示すように、熱的解析部と力学的解析部の 2 つの部分から構成されている。熱的解析部は、燃料棒の温度分布を求めることを目的とし、力学的解析部は変形及び応力ひずみ分布を求めることを目的としている。

両者から得られる温度と変形は、物理的には相互に依存しているので、解析においては厳密には熱伝導と力学的変形の連成問題を解く必要がある。

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、FEMAXI-IV 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と、熱的解析部の中で温度と変形（応力）の関係を連成して解くために開発した簡易な力学的解析部の 2 つ部分からなる。

これら 2 つの力学的解析部は、共通な物性値（物性式）を用いている。その解析結果は必ずしも一致しないが、全体的な傾向としては類似しており、温度、変形（応力）の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。

図 1. 1 に FEMAXI-IV の全体構造の概要を示す。なお、簡易な力学的解析部の取扱い方法については、2.1.3 項の接触力モデルで、詳細な力学的解析部の取扱い方法については、2.2 節の燃料棒全長での力学的ふるまい（解析 I）、および 2.3 節の局所的力学ふるまい（解析 II）で詳述する。

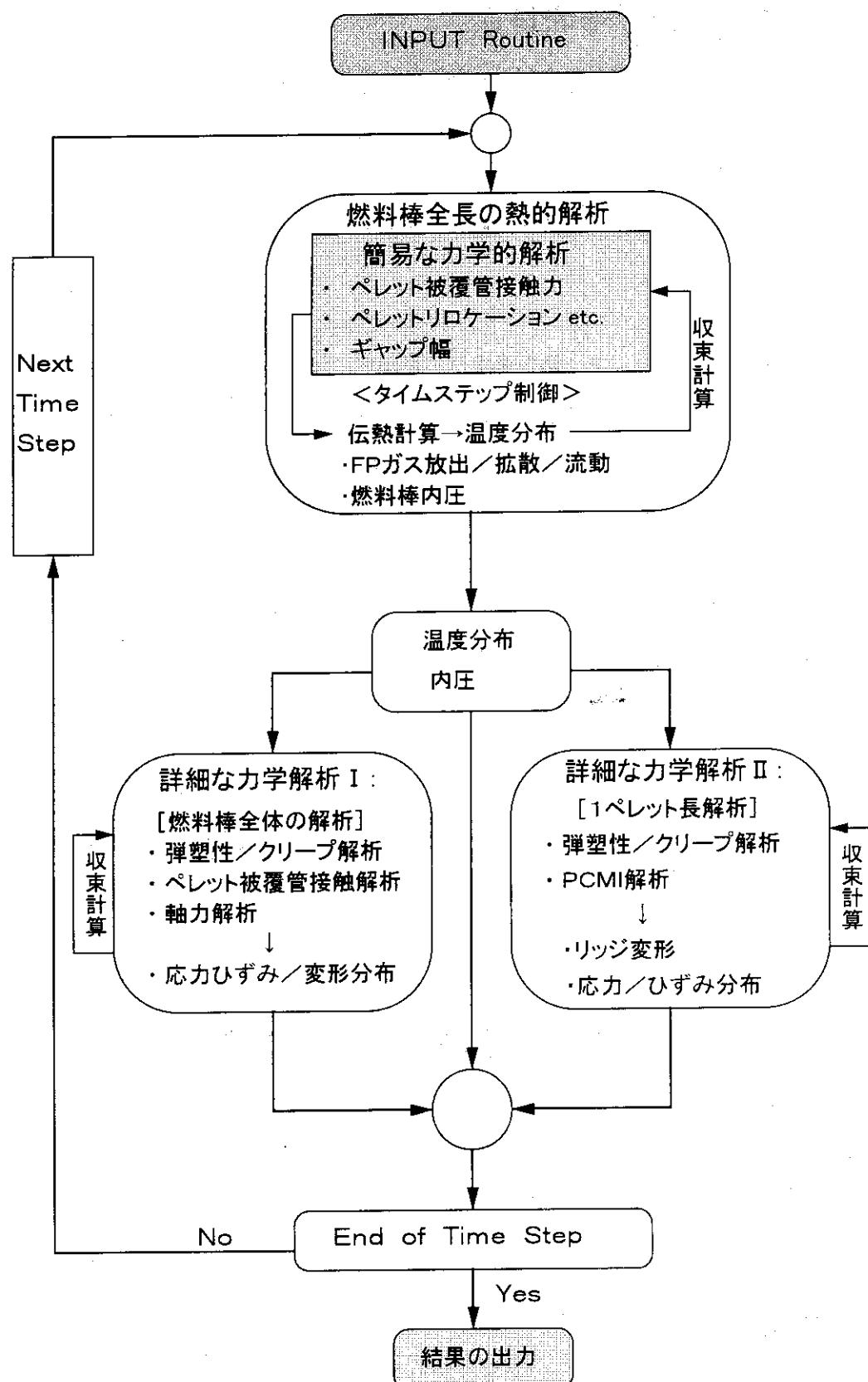


図 1. 1 FEMAXI-IV の全体構造

1. 3 Ver. 2における改良点

以下のような改良を実施したので、本報告による詳細構造と入出力方法の説明と相まって、本コードの使いやすさは大幅に向上している。

(1) バグフィックス

コード全体にわたって細かなバグの修正がされた。

(2) ペレット物性値

最近の知見では、ペレットの熱伝導率は、燃焼度に依存して低下する。この知見を反映して、ペレット熱伝導率の物性値に、燃焼度依存性を含んだ代表的な経験式を採用した。また、焼きしまりおよびスエリングを表現する経験式を、最近の知見に基づいて更新し、ホットプレスモデルを改良した。

(3) 熱応力誘起FP放出モデル

出力の上昇・下降に伴い、ペレット内部には熱応力が発生する。最近の知見では、この応力によりFP放出挙動が影響される。Ver.2ではこの現象をモデル化し、追加した。

(4) その他

入力データおよびパラメータの追加、入力フォーマットの改良を行い、燃料棒内ガスの組成の、入力データによる途中変化の機能、その他を追加した。

2. 解析理論および機能

ここでは、FEMAXI-IVで使用した解析理論および機能について説明する。2.1節では熱的解析部、2.2節では燃料棒全長力学的解析部、2.3節では局所的力学解析部について示す。また、2.4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

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

- (1) 冷却材入口温度から冷却材軸方向温度分布を計算する。
- (2) 被覆管表面熱伝達モデルを用いて、冷却材温度を起点として被覆管表面温度を計算す

1. 3 Ver. 2における改良点

以下のような改良を実施したので、本報告による詳細構造と入出力方法の説明と相まって、本コードの使いやすさは大幅に向上している。

(1) バグフィックス

コード全体にわたって細かなバグの修正がされた。

(2) ペレット物性値

最近の知見では、ペレットの熱伝導率は、燃焼度に依存して低下する。この知見を反映して、ペレット熱伝導率の物性値に、燃焼度依存性を含んだ代表的な経験式を採用した。また、焼きしまりおよびスエリングを表現する経験式を、最近の知見に基づいて更新し、ホットプレスモデルを改良した。

(3) 熱応力誘起FP放出モデル

出力の上昇・下降に伴い、ペレット内部には熱応力が発生する。最近の知見では、この応力によりFP放出挙動が影響される。Ver.2ではこの現象をモデル化し、追加した。

(4) その他

入力データおよびパラメータの追加、入力フォーマットの改良を行い、燃料棒内ガスの組成の、入力データによる途中変化の機能、その他を追加した。

2. 解析理論および機能

ここでは、FEMAXI-IVで使用した解析理論および機能について説明する。2.1節では熱的解析部、2.2節では燃料棒全長力学的解析部、2.3節では局所的力学解析部について示す。また、2.4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

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

- (1) 冷却材入口温度から冷却材軸方向温度分布を計算する。
- (2) 被覆管表面熱伝達モデルを用いて、冷却材温度を起点として被覆管表面温度を計算す

る。

- (3) ペレット中心から被覆管表面までの温度分布を(2)の結果を境界条件として径方向1次元温度モデルで計算する。

これらの計算方法について2.1.1節で解説する。また、半径方向一次元温度分布モデルで必要なギャップ熱伝達、接触力モデル、FPガス放出モデルについては、それぞれ、2.1.2、2.1.3、及び2.1.4節で述べる。

2.1.1 温度分布

(1) 燃料棒表面熱伝達モデル

(1)-1 基本的な仮定・方針

冷却材の温度分布の計算では、冷却材の相変化を考慮してエンタルピーを主変数とする。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、冷却材が軸方向に一様に流れていることを仮定し定常の論理を用いる。ただし、入口温度・流速等が全解析期間を通じて一定である必要はなく、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 ($= \rho v$) ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)

A : 流路断面積 (m^2)

$\overline{\phi}_n$: セグメント n の熱流束 ($\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)

である。

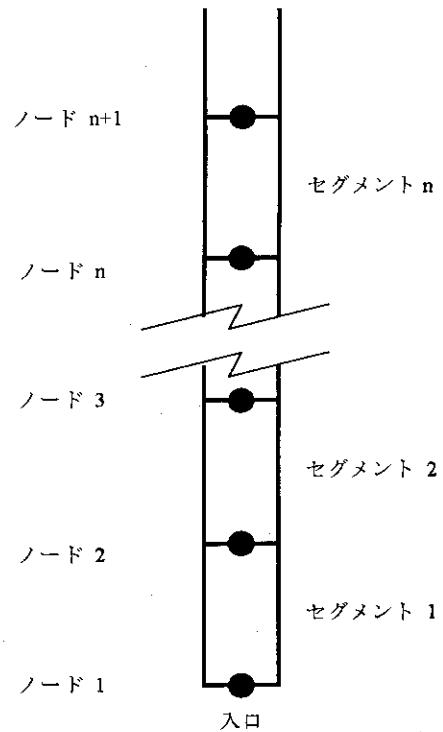


図 2.1 モデル形状

具体的な計算の体系を図 2.2 に示す。

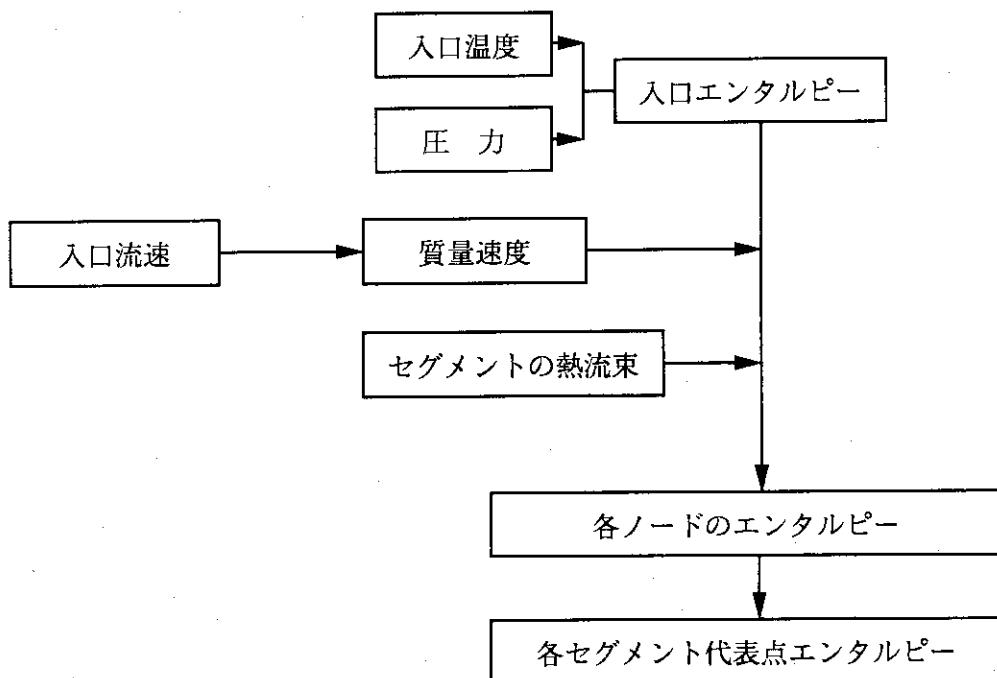


図 2.2 計算体系

(1) - 3 蒸気表を用いた状態量の計算

(1) - 2 の計算および後述する (1) - 4 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。

FEMAXI-IV では、冷却材状態としてはサブクール水と、水に近い 2 相領域を考える。

以下、温度を T 、圧力を P 、エンタルピーを h として取扱い方法を説明する。

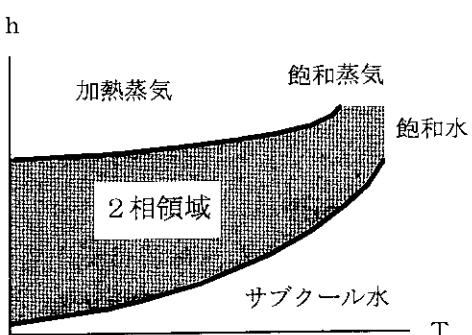


図 2.3 冷却材状態図

[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 $h = h_f$ とする。

c. $T > T_s$ の場合 (過熱蒸気)

過熱蒸気は、FEMAXI-IV 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、 $h = \frac{1}{2}(h_n + h_{n+1})$ で与える。

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)

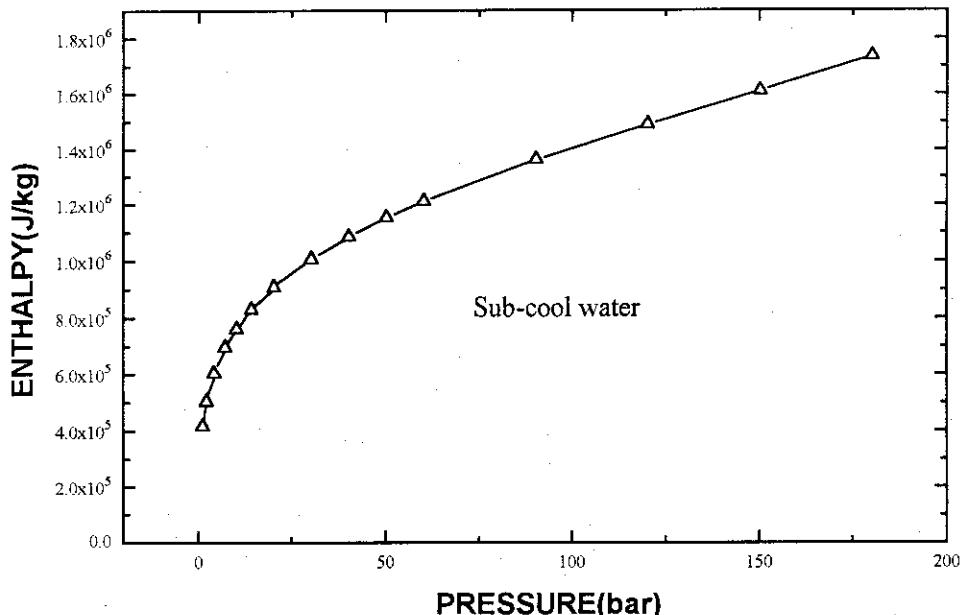
b. $h_f < h < h_g$ の場合 (2 相領域)

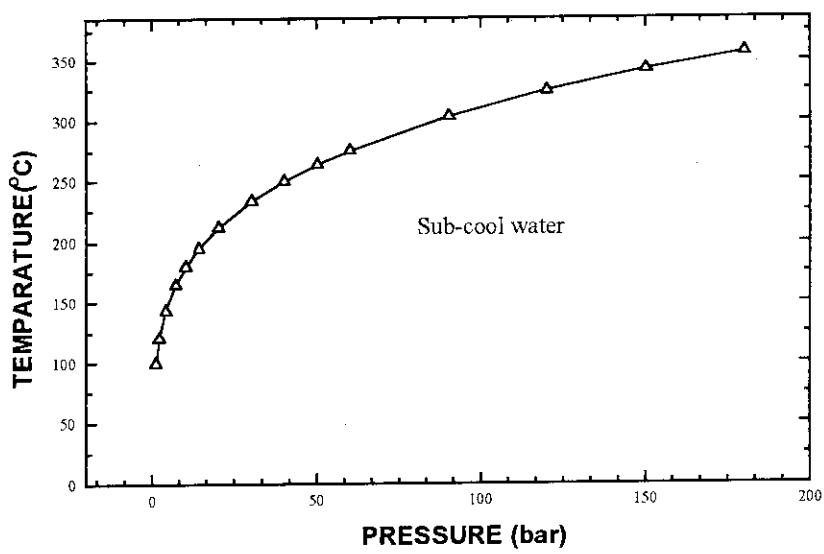
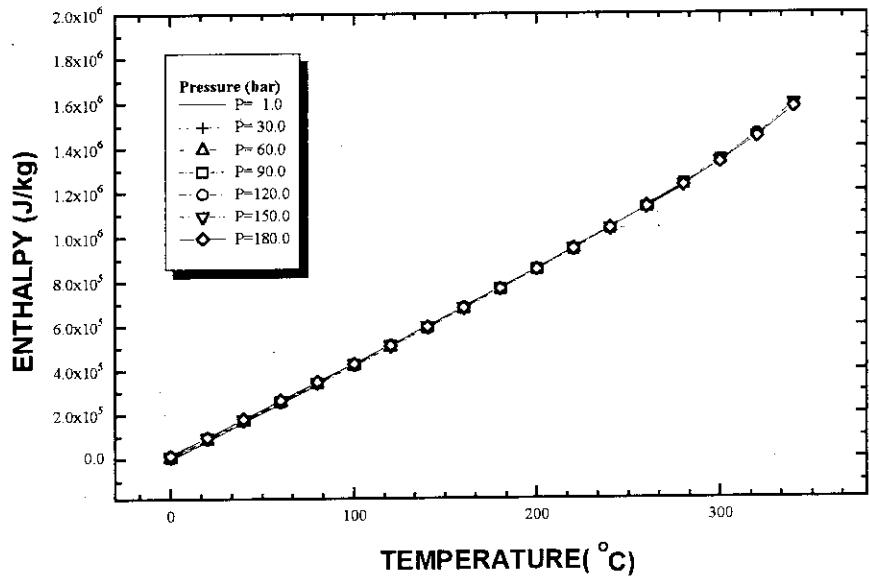
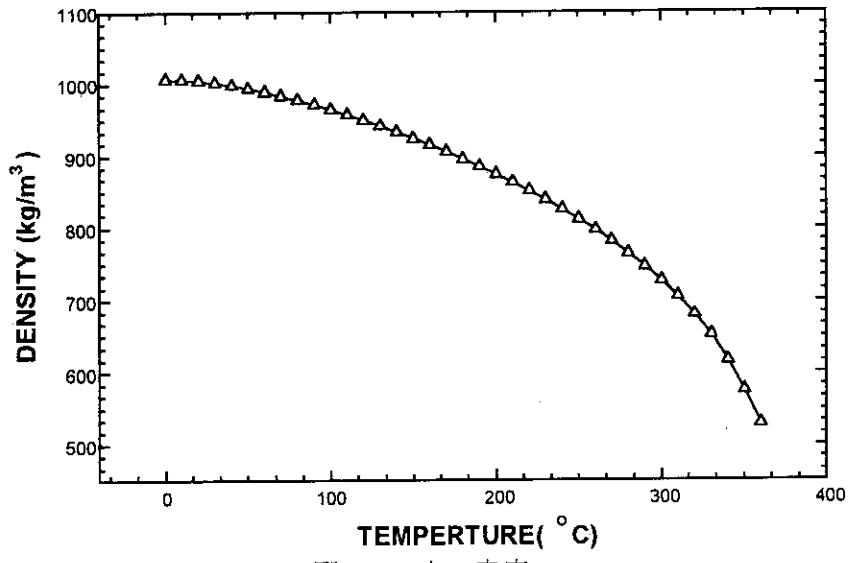
水相温度を採用し、 $T = T_s$ とする。

[2] その他の状態変数

FEMAXI-IVにおいては、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⁽⁴⁾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 $\mu_s(T)$ 、熱伝導率 $k_s(T)$ 、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、 ρ 、 μ 、 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、FEMAXI-IV 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 $h(p)$ 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 ρ

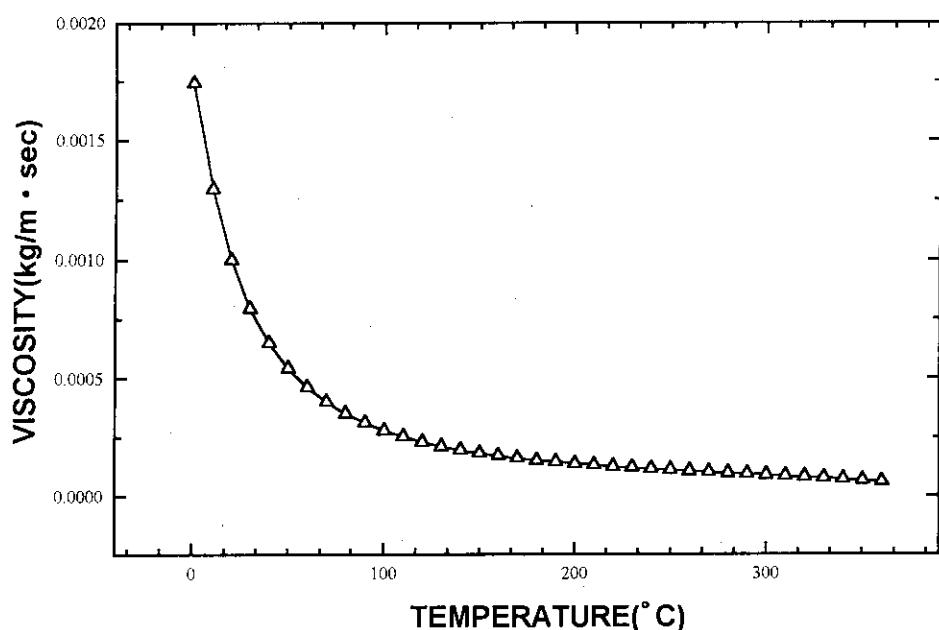


図 2.8 水の粘性係数 μ

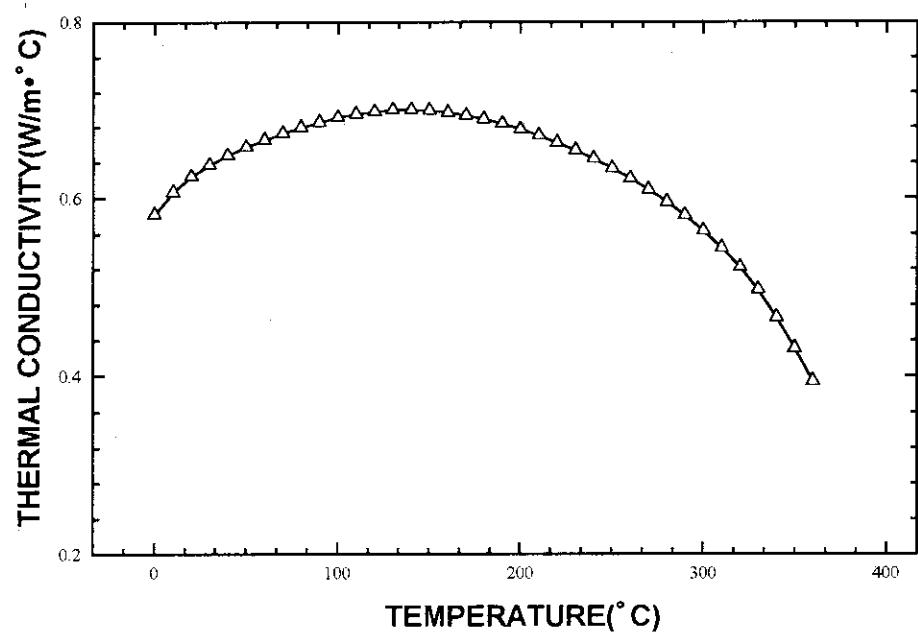


図 2.9 水の熱伝導度 k

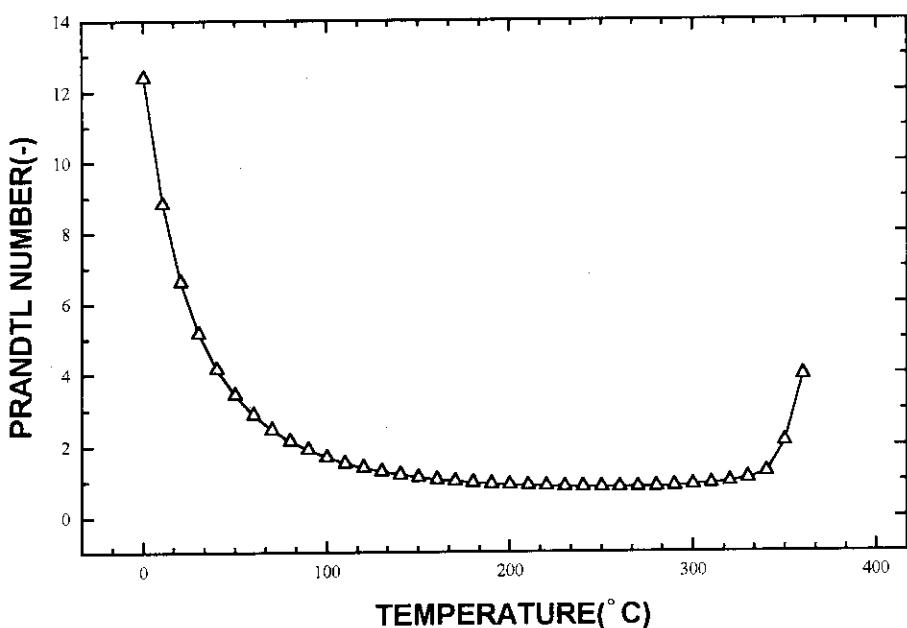


図 2.10 水のプラントル数 Pr

(1)-4 被覆管表面温度（熱伝達モデルの使用法）

FEMAXI-IV 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、

ϕ_N ：被覆管表面熱流束 (W/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⁽⁴⁾および Jens-Lottes 式⁽⁵⁾

（(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、(2.1.15)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、

ϕ_N : 被覆管表面熱流束 (W/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 ϕ_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 ϕ_N は、サブクール状態における熱伝達に関する熱流束 ϕ_{N1} と 2 相状態における熱伝達に関する熱流束 ϕ_{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 ϕ_{N1} は、(2.1.15)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 ϕ_{N2} についても、(2.1.14)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 ϕ_{N2} の関数として与えられている。そこで ϕ_{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 ϕ_{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 ϕ について解けば

$$\phi_{N2}^{1/4} = \alpha^*(T_N - T_s)$$

$$\phi_{N2} = \alpha^{*4}(T_N - T_s)^4$$

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。

FEMAXI-IV 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が、(2.1.14)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、

ϕ_N : 被覆管表面熱流束 (W/m²)

h_w : Jens-Lottes 式による熱伝達係数 (W/m²·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 ϕ_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

Jens-Lottes の実験式⁽⁵⁾

$$h_w = 0.1263 \cdot \exp\left(\frac{P_w}{6.201 \times 10^6}\right) \phi_s^{0.75} \quad (2.1.14)$$

h_w : 表面熱伝達係数 (W/cm²·K)

P_w : 冷却水圧力 (N/m²)

ϕ_s : 被覆管外面熱流束 (W/cm²)

Dittus-Boelter の式⁽⁴⁾

$$h_w = 0.023 \frac{k}{D_e} \left(\frac{D_e V \rho}{\mu} \right)^{0.2} Pr^{0.4} \quad (2.1.15)$$

h_w : 表面熱伝達係数 (W/m²·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)

ρ : 冷却水密度 (kg/m³)

μ : 冷却水の粘度 (kg/m·s)

Pr : プラントル数

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

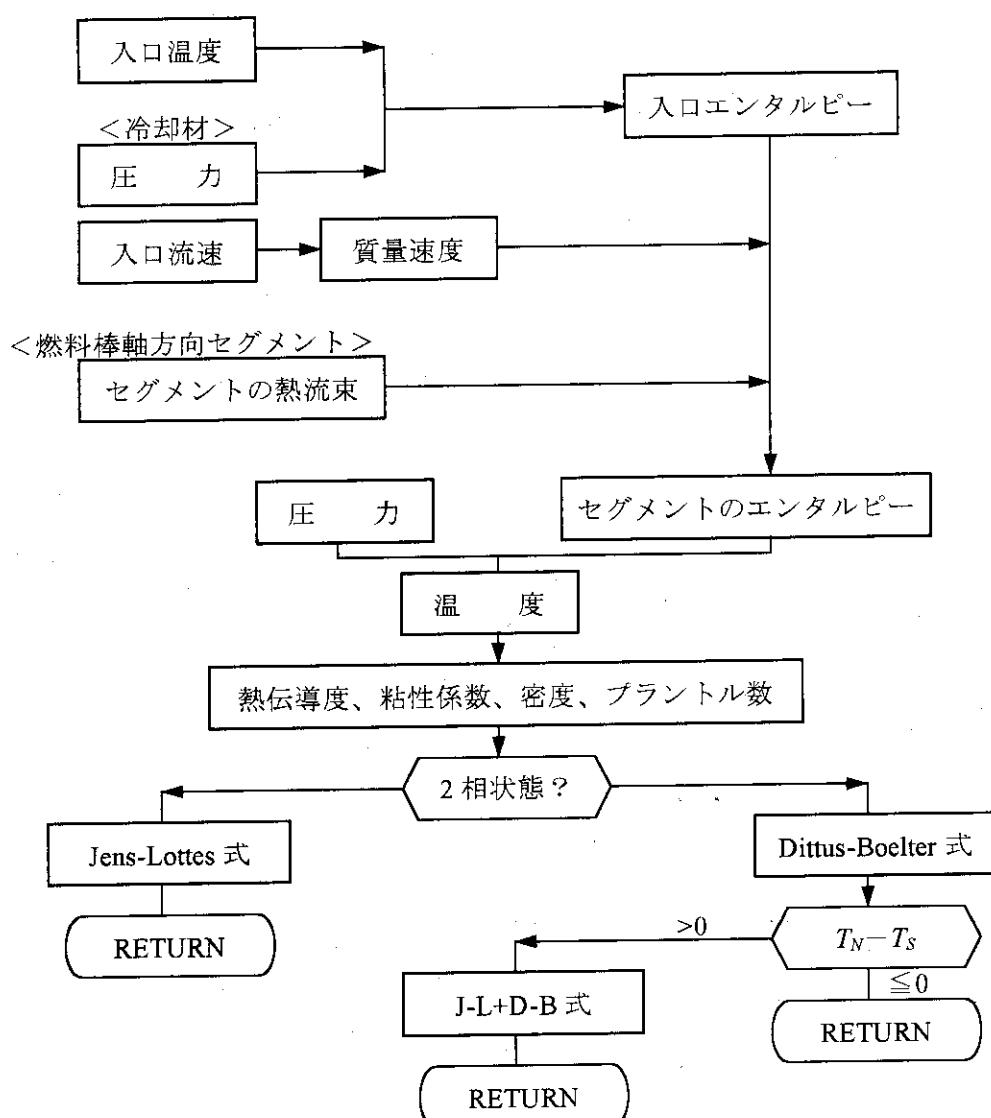


図 2.11 プログラムの流れ図

(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(2.1.15)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、FEMAXI-IV では、これらの値が同時に二つとも入力により指定されていない場合には、一方から他方を換算する方法や燃料棒間ピッチを用いて計算する方法を用意している。以下にこれらの値の確定方法のまとめを示す。

[1] 流路相当直径

- 1) 流路相当直径が入力された場合は、その値が用いられる。
- 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されてない場合には、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。

[2] 流路断面積

- 1) 流路断面積が入力された場合は、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されない場合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 ²)
DE	…流路相当直径	(cm)

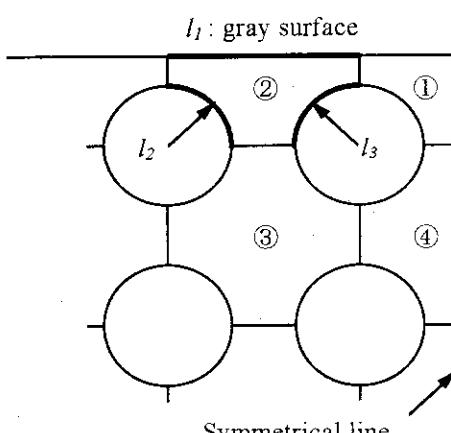


図 2.12 チャンネルモデル

(2) 半径方向1次元温度モデル

半径方向1次元の温度解析においては、燃料棒の軸方向の熱伝導を無視して、半径方向一次元熱伝導方程式で記述する。燃料内の各メッシュにおける物性値は温度依存があると仮定し、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ものと仮定する。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。

$$\frac{\partial}{\partial t} [C_v(T, r) T(r, t)] = \nabla k(T, r) \cdot \nabla T(r, t) + q(r, t) \quad (2.1.19)$$

ここで、

T : 温度 (K)、

r : 径方向座標 (m)

t : 時間 (s)、

C_v : 体積比熱 (J/m^3)、

k : 热伝導率 ($W/m \cdot K$)、

q : 単位体積あたりの発熱量 ($J/m^3 \cdot s$)

である。

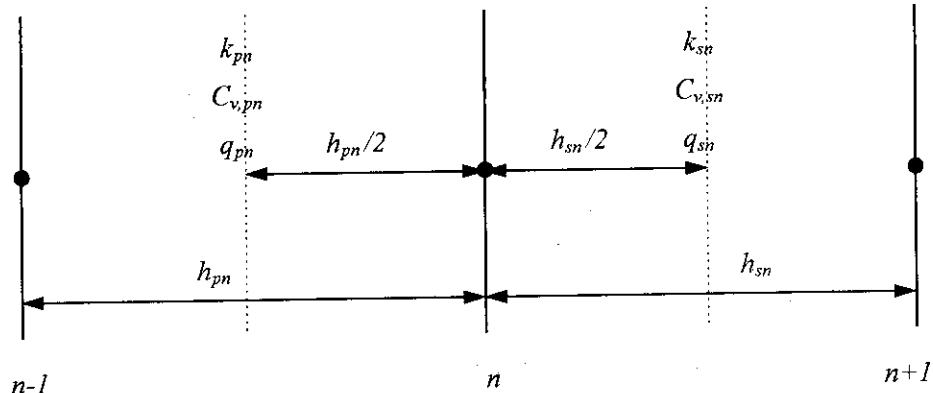


図 2.13 メッシュモデル

(2.1.19)式について体積積分を行う。ただし、積分体積は図 2.13 の破線で挟まれた部分の体積である。

$$\iiint_V \frac{\partial}{\partial t} C_v(T, r) T(r, t) dV = \iiint_V \nabla k(T, r) \cdot \nabla T(r, t) dV + \iiint_V q(r, t) dV \quad (2.1.20)$$

1次元問題であるので、体積の次元は径方向 r 以外は 1 とおく。共通ファクター 2π を省略し、時間微分に対して前進差分法を用いると、(2.1.20)式の第1項は、

$$\begin{aligned} \iiint_V \frac{\partial}{\partial t} [C_v(T, r) T(r, t)] dV &\approx \iiint_V C_v(T, r) \frac{\partial T}{\partial t}(r, t) dV \\ &\approx \frac{(T_n^{m+1} - T_n^m)}{h_{pn}} \left[C_{v, pn} \frac{h_{pn}}{2} \left(r_n - \frac{h_{pn}}{4} \right) + C_{v, sn} \frac{h_{sn}}{2} \left(r_n + \frac{h_{sn}}{4} \right) \right] \end{aligned} \quad (2.1.21)$$

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。(2.1.20)式の第2項は、

$$\begin{aligned} \iiint_V \nabla k(T, r) \cdot \nabla T(r, t) dV &= \iint_s k(T, r) \nabla T(r, t) \cdot d\bar{S} \\ &\approx -\frac{k_{pn}(T_n^{m+1/2} - T_{n-1}^{m+1/2})}{h_{pn}} \left(r_n - \frac{h_{pn}}{2} \right) + \frac{k_{sn}(T_{n+1}^{m+1/2} - T_n^{m+1/2})}{h_{sn}} \left(r_n + \frac{h_{sn}}{2} \right) \end{aligned} \quad (2.1.22)$$

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。

$$\begin{aligned} h_{pn}^V &= \frac{h_{pn}}{2} \left(r_n - \frac{h_{pn}}{4} \right), \quad h_{sn}^V = \left(r_n + \frac{h_{sn}}{4} \right) \\ h_{pn}^s &= \frac{1}{h_{pn}} \left(r_n - \frac{h_{pn}}{2} \right), \quad h_{sn}^s = \frac{1}{h_{sn}} \left(r_n + \frac{h_{sn}}{2} \right) \end{aligned} \quad (2.1.23)$$

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

次に(2.1.20)式の第3項での発熱項 $q(r, t)$ を変数分離し、

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

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(2.1.20)式の第3項は、

$$\iiint_V q(r, t) dV \approx (Q_{pn} h_{pn}^V + Q_{sn} h_{sn}^V) P_f P(t_{m+1/2}) \quad (2.1.24)$$

となる。

以上に示された、(2.1.20)式各項の近似式である(2.1.21)、(2.1.22)、及び(2.1.24)式の右辺を合わせることにより、(2.1.20)式は n 番目のメッシュ点について、

$$\begin{aligned} \frac{(T_{m+1} - T_n^m) D_n}{\Delta t} &= - \left(T_n^{m+1/2} - T_{n-1}^{m+1/2} \right) k_{pn} h_{pn}^s + \left(T_{n+1}^{m+1/2} - T_n^{m+1/2} \right) k_{sn} h_{sn}^s \\ &\quad + (Q_{pn} h_{pn}^V + Q_{sn} h_{sn}^V) P_f P\left(t_{n+1/2}\right) \end{aligned} \quad (2.1.25)$$

という差分近似式に変換される。(2.1.25)式に対してクランク-ニコルソン法を適用すると、

$$\begin{aligned} \frac{(T_n^{m+1} - T_n^m)D_n}{\Delta t} = & \left(\frac{(T_{n-1}^{m+1} + T_n^m)}{2} - \frac{(T_{n-1}^{m+1} + T_{n-1}^m)}{2} \right) k_{pn} h_{pn}^s \\ & + \left(\frac{T_{n+1}^{m+1} + T_{n+1}^m}{2} - \frac{T_n^{m+1} + T_n^m}{2} \right) k_{sn} h_{sn}^s \\ & + (\mathcal{Q}_{pn} h_{pn}^V + \mathcal{Q}_{sn} h_{sn}^V) P_f \frac{P(t_{m+1}) + P(t_m)}{2} \end{aligned} \quad (2.1.26)$$

となる。ここで、熱伝導率 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 $n+1$ の平均温度よりそれぞれ求める。

(2.1.26)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、

$$\begin{aligned} a_n &= -\frac{k_{pn} h_{pn}^s \Delta t}{2}, \quad c_n = -\frac{k_{sn} h_{sn}^s \Delta t}{2} \\ b_n &= D_n - a_n - c_n \\ d_n^m &= -a_n T_{n-1}^m + (D_n + a_n + c_n) T_n^m - c_n T_{n+1}^m \\ &+ \Delta t (\mathcal{Q}_{pn} h_{pn}^V + \mathcal{Q}_{sn} h_{sn}^V) P_f \left\{ \frac{P(t_{m+1}) + P(t_m)}{2} \right\} \end{aligned} \quad (2.1.27)$$

である。

次に、ギャップ領域を図 2.14 に示す。

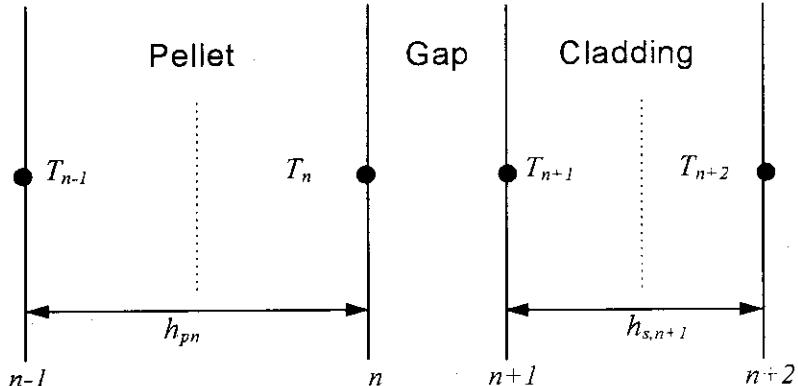


図 2.14 ギャップモデル

ギャップ領域については、(2.1.25)式と同様に差分近似すると、

$$\frac{(T_n^{m+1} - T_n^m)D'_n}{\Delta t} = - \left(T_{n+\frac{1}{2}}^{m+\frac{1}{2}} - T_{n-\frac{1}{2}}^{m+\frac{1}{2}} \right) k_{pn} h_{pn}^s + \left(T_{n+\frac{1}{2}}^{m+\frac{1}{2}} - T_n^{m+\frac{1}{2}} \right) h_g \\ + Q_{pn} h_{pn}^V P_f P(t_{m+\frac{1}{2}}) \quad (2.1.28)$$

$$\frac{(T_{n+1}^{m+1} - T_{n+1}^m)D''_{n+1}}{\Delta t} = - \left(T_{n+\frac{1}{2}}^{m+\frac{1}{2}} - T_n^{m+\frac{1}{2}} \right) h_g + \left(T_{n+\frac{1}{2}}^{m+\frac{1}{2}} - T_{n-\frac{1}{2}}^{m+\frac{1}{2}} \right) k_{s,n+1} h_{s,n+1}^s \\ + Q_{s,n+1} P_f P(t_{m+\frac{1}{2}}) \quad (2.1.29)$$

となる。ここで、 $D'_n = C_{v,pn} h_{pn}^V$ 、 $D''_{n+1} = C_{v,s,n+1} h_{s,n+1}^V$ 、および h_g はギャップ熱伝達係数である。また、燃料棒中心領域を図 2.15、被覆管表面領域を図 2.16 に示す。

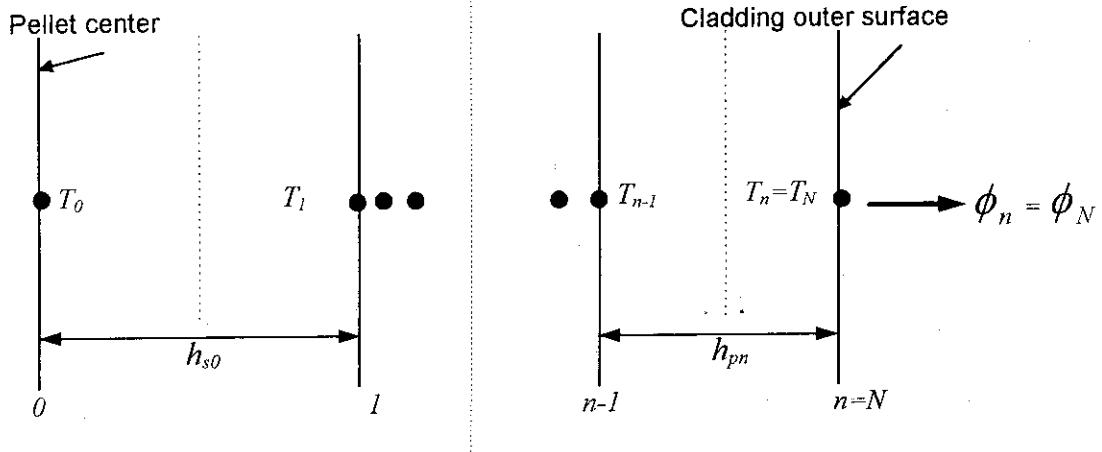


図 2.15 燃料棒中心モデル

図 2.16 被覆管表面モデル

燃料棒中心領域については(2.1.28)式を差分近似して表すと、

$$\frac{(T_0^{m+1} - T_0^m)}{\Delta t} C_{v,s0} = \left(T_1^{m+\frac{1}{2}} - T_0^{m+\frac{1}{2}} \right) k_{s0} h_{s0}^s + Q_{s0} h_{s0}^V P_f P(t_{m+\frac{1}{2}}) \quad (2.1.30)$$

となる。

被覆管表面領域についての境界方程式は、

$$\frac{(T_n^{m+1} - T_n^m)}{\Delta t} C_{v,pn} h_{pn}^V = - \left(T_n^{m+\frac{1}{2}} - T_{n-\frac{1}{2}}^{m+\frac{1}{2}} \right) k_{pn} h_{pn}^s - r_n \phi_n + Q_{pn} h_{pn}^V P_f P(t_{m+\frac{1}{2}}) \quad (2.1.31)$$

である。

(2.1.31)式の差分近似式を

$$a_n T_{n-1}^{m+1} + b_n T_n^{m+1} = d_n \quad (2.1.32)$$

の形式に表すと係数 a_n, b_n, d_n は、

$$a_n = -\frac{k_{pn} h_{pn}^s \Delta t}{2} \quad (2.1.33)$$

$$b_n = C_{v,pn} h_{pn}^V - a_n \quad (2.1.34)$$

$$\begin{aligned} d_n &= -a_n T_{n-1}^m + (C_{V,pn} h_{pn}^V - a_n) T_n^m \\ &\quad - \Delta t r_n \left(\frac{\phi_n^{m+1} + \phi_n^m}{2} \right) + \Delta t Q_{pn} h_{pn}^V P_f \left\{ \frac{P(t_{m+1}) + P(t_m)}{2} \right\} \\ &= d'_n + d''_n \phi_n^{m+1} \end{aligned} \quad (2.1.35)$$

となる。ここで ϕ_n は被覆管表面熱流束である。

ただし、(2.1.35)式中の時刻 t_m における熱流束 ϕ_n^m については、定常計算では

$$\phi_n^m = q^m / 2\pi r_n, \quad (2.1.36)$$

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。

(2.1.32)式～(2.1.35)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。

$$T_{n-1}^{m+1} = -E_{n-1} T_n^{m+1} + F_{n-1} \quad (2.1.37)$$

(2.1.33)～(2.1.35)式及び(2.1.37)式を(2.1.32)式に代入すると、

$$A_1 T_n^{m+1} + B_1 = \phi^{m+1} \quad (2.1.38)$$

ここで

$$A_1 = (b_n - a_n E_{n-1}) / d''_n \quad (2.1.39)$$

$$B_1 = (a_n F_{n-1} - d'_n) / d''_n \quad (2.1.40)$$

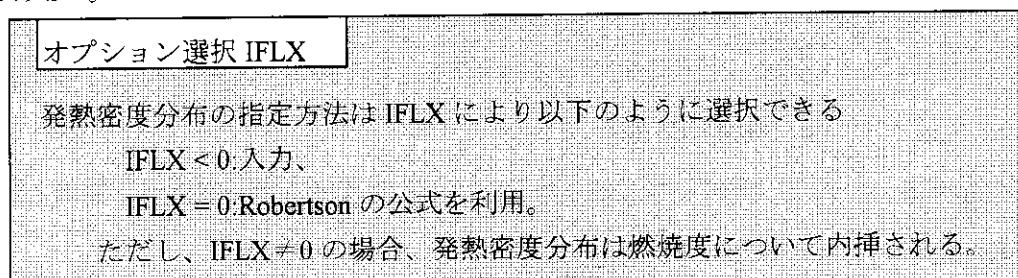
である。すると A_1, B_1 は既知量である。しかし(2.1.44)式は(2.1.2)式に等しく、(2.1.2)式においては A, B は既知となるので、(1)～4 項で述べたように T_n^{m+1} を求めることができる。
したがって、ガウスの消去法による後退代入を行えば、順次 T^{m+1} を求めることができる。

なお、時間増分 Δt は、

$$\Delta t = \left\{ \frac{(\Delta r)^2}{k^i} \right\}_{\min} \cdot \eta \quad , \quad \eta : \text{制御パラメータ} \quad (2.1.41)$$

を用いて決定する。 $\{\dots\}_{\min}$ は、陽解法を採用したときに安定解を得るために必要な最大の時間増分である。FEMAXI-IV ではクランクニコルソン法 ($\theta = 1/2$) を採用しているため、さらに大きな時間増分を用いても安定解を得ることができる。計算精度が充分で計算時間が長くなりすぎない時間増分として、 $\eta = 10$ を選んだ。

なお、分布関数 $Q(r)$ 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) を用いる方法である⁽⁶⁾。



Robertson の公式では、分布関数を次式で与えている。

$$Q(r) = \frac{(b+2)(1-h^2)[(1-a)r^b + (a-h^b)]}{b(1-h^2)(a-h^b) + 2(1-h^b)(1-ah^2)} \quad (2.1.42)$$

ここで、

a : ペレット内面対外面発熱密度比 (-)

b : 発熱密度関数 $Q(r)$ における形状指数 (-)

h : 規格化したペレット内半径 (-)

である。

(2.1.42)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、次のように求められる。

Robertson は発熱分布に関し次の表式を与えている。

$$Q(R) = I_0(k \cdot R) + \frac{I_1(k \cdot R_1)}{K_1(k \cdot R_1)} \cdot K_0(k \cdot R) \quad (2.1.43)$$

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 (cm^{-1})

である。

k は次式で計算される。

$$k = 0.328(E \cdot D)^{0.8} + 0.54 \left(\frac{0.5}{R_p} \right)^{0.82} \cdot (E \cdot D)^{0.19} \quad (2.1.44)$$

ここで、

E : ^{235}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。

(2.1.42)式における形状指数 b は、(2.1.43)式が 1 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(2.1.43)式を用いて、次のように表す。

$$a = \frac{Q(R_i)}{Q(R_p)} \quad (2.1.45)$$

2.1.2 ギャップ熱伝達

ギャップ熱伝達率は、Ross and Stoute のモデルを修正した次式により表す⁽⁷⁾。

$$h = \frac{\lambda_{gas}}{C(R_{eff} + R_2) + (g_1 + g_2) + GAP} + \frac{\lambda_m \cdot P_c}{0.5 \cdot R^{1/2} \cdot H} + h_r \quad (2.1.46)$$

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、

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

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

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

λ_{gas} : 混合ガスの熱伝導度 (W/cm·K)

P_c : ペレットと被覆管の接触圧力 (Pa)

R_{eff} : ペレットみかけの表面粗さ (cm)

R_2 : 被覆管表面粗さ (cm)

$g_1 + g_2$: 固相気相間温度ジャンプ距離 (cm)

GAP : 半径方向ギャップ (cm)

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

H : 被覆管メイヤー硬度 (Pa) ($H = 2.8\sigma_y$ ⁽⁹⁾)

σ_y : 降伏応力 (Pa)

σ : ステファン・ボルツマン定数 (W/cm·K⁴) ($\sigma = 5.67 \times 10^{-12}$)

ε_p : ペレット放射率 (-)

ε_c : 被覆管放射率 (黒色酸化被膜) (-)

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

調整パラメータ Rl

ペレットみかけの表面粗 R_{eff} は入力パラメータ $Rl(\mu m)$ により指定できる。標準値は $1 \mu m$ 。

(1) 混合ガス熱伝導度

これは、MATPRO モデルより次のように表される⁽⁸⁾。

$$\lambda_{gas} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\lambda_i}{1 - \sum_{j=1, j \neq i}^n \phi_{ij} \frac{x_j}{x_i}} \right) \quad (2.1.47)$$

ただし、

$$\phi_{ij} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_j} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{M_i}{M_j} \right)^{\frac{1}{4}} \right]^2}{2^{\frac{3}{2}} \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right)^{\frac{1}{2}}} \left[1 + \frac{2.41(M_i - M_j)(M_i - 0.142M_j)}{(M_i + M_j)^2} \right] \quad (2.1.48)$$

ここで、

x_i : ガス i のモル比

λ_i : ガス i の熱伝導度 (W/cm·K)

M_i : ガス i モル重量

である。ガスの種類として、ヘリウム、窒素、クリプトンおよびキセノンを扱う。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、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) 固相気相間温度ジャンプ距離

固相気相間温度ジャンプ距離は次式で与えられる。

$$g_1 + g_2 = \sum_{i=1}^n (g_1 + g_2)_i \cdot \frac{10^5}{P_{gas}} \quad (2.1.49)$$

ここで、

$(g_1 + g_2)_i$: ガス i の固相気相間温度ジャンプ距離 (cm)

P_{gas} : ガス圧力 (Pa)

である。

$(g_1 + g_2)_i$ は、Ross and Stoute モデルに従い、ヘリウム、窒素、クリプトンおよびキセノンに対してそれぞれ 10×10^{-4} 、 5×10^{-4} 、 1×10^{-4} および 1×10^{-4} (cm) を用いる。

ガス圧力 P_{gas} の計算については、後の(2.1.204)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 [熱計算中で用いる簡易な力学モデル]

(2.1.46)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、FEMAXI-IV は、2.2、2.3 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を実行。

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。

$$u_f = u^{rel} + \sum_{i=1}^{10} (\varepsilon_i^{th} + \varepsilon_i^{den} + \varepsilon_i^{ss} + \varepsilon_i^n + \varepsilon_i^c) \Delta r_i \quad (2.1.50)$$

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)

ε_i^{th} : リング i の熱ひずみ (-)

ε_i^{den} : リング i のやきしまり (-)

ε_i^{ss} : リング i の固体 FP (拘束) スウェーリング (-)

ε_i^n : リング i の気体 FP (非拘束) スウェーリング (-)

ε_i^c : リング i のクリープひずみ (-)

Δr_i : リング i の幅 (cm)

i : リングの番号 (半径方向に 10 リングとする)

である。

このうち、 ε_i^{th} , ε_i^{den} , ε_i^{ss} については接触状態とは無関係に決定できるひずみとする。 ε_i^n , ε_i^c については接触状態に依存する。ペレットの気体 FP によるスウェーリングは非拘束下 (接触力 0) でのみ発生可能であり、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

ペレットリロケーションパラメータは、hot stand-by での半径方向リロケーション変位の、ギャップ幅に対する割合として与えられ、XRELOC で入力する。標準値は 0.2。

ペレットのクリープひずみ速度式は、MATPRO-09 の式、

$$\dot{\varepsilon}^c = \frac{(A_1 + A_2 F) \bar{\sigma} e^{-Q_1/RT}}{(A_3 + f_d) G^2} + \frac{A_4 \bar{\sigma}^{4.5} e^{-Q_2/RT}}{(A_6 + f_d)} + A_7 \bar{\sigma} F e^{-Q_3/RT} \quad (2.1.51)$$

を用いる⁽⁸⁾。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^{-1})

F : 核分裂速度 ($= 10^{19} \text{ fissions/m}^3 \cdot \text{s}$ を FEMAXI-IV 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、平面応力条件を採用すると、 $\sigma_z = 0$ 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と、

$$\begin{Bmatrix} \dot{\varepsilon}_{r,i}^c \\ \dot{\varepsilon}_{z,i}^c \\ \dot{\varepsilon}_{\theta,i}^c \end{Bmatrix} = \frac{\dot{\varepsilon}_i^c}{2\bar{\sigma}} \begin{Bmatrix} 2\sigma_r - \sigma_\theta \\ -\sigma_r - \sigma_\theta \\ 2\sigma_\theta - \sigma_r \end{Bmatrix} = \frac{\dot{\varepsilon}_i^c}{2} \begin{Bmatrix} -\frac{1}{2} \\ 1 \\ -\frac{1}{2} \end{Bmatrix} \quad (2.1.52)$$

となり、周方向クリープ速度は

$$\dot{\varepsilon}_{\theta,i}^c = -\frac{1}{2} \dot{\varepsilon}_i^c \quad (2.1.53)$$

である。

(2) 被覆管の半径方向変位

被覆管の半径方向変位については、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。

$$u = \frac{r_{ci}}{E} \left[\frac{(P_{gas} + P_{fc})(r_{ci}^2 + r_{co}^2) - 2P_w r_{co}^2}{r_{co}^2 - r_{ci}^2} + \nu P_{gas} \right] + (\varepsilon^{th} + \varepsilon^c) \frac{r_{co} + r_{ci}}{2} \quad (2.1.54)$$

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 : 冷却水圧力 (Pa)

ν : 被覆管のボアソン比

ε^{th} : 被覆管の熱ひずみ

ε^c : 被覆管のクリープひずみ

である。

被覆管の応力の円周方向成分及び軸方向成分は、薄肉円筒殻理論（シェルモデル）より、

$$\sigma_\theta = \frac{r_{ci}(P_{fc} + P_{gas}) - r_{co}P_w}{r_{co} - r_{ci}} \quad (2.1.55)$$

$$\sigma_z = \frac{r_{ci}^2(P_{fc} + P_{gas}) - r_{co}^2P_w}{r_{co}^2 - r_{ci}^2} \quad (2.1.56)$$

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

$$\bar{\sigma} = \left[\frac{1}{2} \left\{ (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + \sigma_\theta^2 + \sigma_z^2 \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.1.57)$$

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、

$$d\varepsilon^c = f(\bar{\sigma}, T, \phi, \bar{\varepsilon}^c) \cdot dt \quad (2.1.58)$$

で与える。ただしこれは MATPRO-09 の式⁽⁸⁾ から

$$f = \dot{\varepsilon}^c = 2 \left[C_1 \phi e^{-Q_1/RT} \left\{ \bar{\sigma} + C_2 e^{Q_2 \bar{\sigma}} \right\} \right]^2 \times \left(\frac{3600}{\bar{\varepsilon}^c} \right) \quad (2.1.59)$$

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

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

$C_2 = 7.252 \times 10^2$, $Q_2 = 4.967 \times 10^{-8}$

ϕ : 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。

円周方向および軸方向のクリープひずみ増分は、

$$d\varepsilon_\theta^c = \frac{1}{2\bar{\sigma}} (2\sigma_\theta - \sigma_z) \cdot d\bar{\varepsilon}^c \quad (2.1.60)$$

$$d\varepsilon_z^c = \frac{1}{2\bar{\sigma}} (2\sigma_z - \sigma_\theta) \cdot d\bar{\varepsilon}^c \quad (2.1.61)$$

である。なお、(2.1.58)式中の $\bar{\varepsilon}^c$ については

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

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

また、(2.1.54)式中の ε^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

$$\varepsilon^c = \varepsilon_{\theta,n+1}^c = \sum_{m=1}^{n+1} d\varepsilon_{\theta,m}^c \quad (2.1.62)$$

で与える。

(3) ギャップ幅と接触力

ここではギャップ幅とペレット-被覆管接触力 P_{fc} の関係を与える。

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。

$$\delta = \delta_o + u_c - u_f \quad (2.1.63)$$

ここで、

δ : ペレットと被覆管の間の半径ギャップ幅 (m)

δ_o : 製造時のギャップ幅 (m)

u_c : 被覆管の半径方向変位 (m)

u_f : ペレットの半径方向変位 (m)

である。 δ が負と算出されると、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、ペレットと被覆管幅が

$$\delta_{fc} = -\delta = -(\delta_o + u_c - u_f) > 0 \quad (2.1.64)$$

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

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

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

$$\delta_{fc} = \delta_f + \delta_c \quad (2.1.65)$$

と書ける。

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

$$\begin{aligned} \varepsilon_r = \varepsilon_\theta &= \frac{\delta_f}{r_{ci}} \\ P_{fc} &= E_f \left(\frac{\delta_f}{r_{ci}} \right) \end{aligned} \quad (2.1.66)$$

が成り立つ。

また、被覆管側では、 $\varepsilon_\theta = \delta_c / r_{ci}$ より、

$$\begin{aligned} \sigma_\theta &= E_c \varepsilon_\theta = E_c \frac{\delta_c}{r_{ci}} \\ P_{fc} &= \sigma_r = \sigma_\theta \frac{t}{r_{ci}} = E_c \frac{\delta_c}{r_{ci}} \cdot \frac{t}{r_{ci}} \quad (t = r_{co} - r_{ci} : \text{被覆管肉厚}) \end{aligned}$$

すなわち、

$$P_{fc} = E_c \frac{\delta_c(r_{co} - r_{ci})}{r_{ci}^2} \quad (2.1.67)$$

が成り立つ。

(2.1.65)～(2.1.67)式より、 P_{fc} を消去し、 δ_f 、 δ_c について解くと、

$$\delta_f = \frac{E_c(r_{co} - r_{ci})}{E_c(r_{co} - r_{ci}) + E_f r_{ci}} \delta_{fc} \quad (2.1.68)$$

$$\delta_c = \frac{E_f r_{ci}}{E_c(r_{co} - r_{ci}) + E_f r_{ci}} \delta_{fc} \quad (2.1.69)$$

を得る。

ところで、次の(4)項で示すペレット剛性回復モデルの仮定に基づいて、ペレットのヤング率 E_f に次のような条件を与える。

- ① $\delta_{fc} = 0$ のとき、 $E_f = 0$
- ② $\delta_{fc} \geq 2\delta_{rel}$ のとき、 $E_f = E$ (本来の物性値)
- ③ $0 < \delta_{fc} < 2\delta_{rel}$ のとき、 E_f は δ_{fc} の1次関数

まず、 $0 < \delta_{fc} < 2\delta_{rel}$ の状態を考える。 $E_f = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ の関係から $E_f = \frac{dP_{fc}}{d\delta_{fc}}$ と書けるが、 E_f が

δ_{fc} の1次関数であるという条件から、接触力 P_{fc} は δ_{fc} の2次関数として与えられることがわかる。そこで、

$$P_{fc} = a_1 \delta_{fc}^2 + a_2 \delta_{fc} + a_3$$

とおけば、条件①より、 $\delta_{fc} = 0$ のとき $P_{fc} = 0$ であることから $a_3 = 0$ となる。また、

$$E_f = \frac{\partial P_{fc}}{\partial \delta_{fc}} = 2a_1 \delta_{fc} + a_2$$

となるが、 $\delta_{fc} = 0$ のとき $E_f = 0$ であることから、 $a_2 = 0$ となる。したがって、 $P_{fc} = a_1 \delta_{fc}^2$ となる。これを(2.1.67)式に代入し、 δ_c について整理すれば、

$$\delta_c = \frac{r_{ci}^2}{E_c(r_{co} - r_{ci})} P_{fc} = \frac{r_{ci}^2}{E_c(r_{co} - r_{ci})} a_1 \delta_{fc}^2$$

となり、 δ_c は、区間 $0 < \delta_{fc} < 2\delta_{rel}$ において δ_{fc} の2次関数となることがわかる。上式の δ_{fc}^2 の係数を α とおけば

$$\delta_c = \alpha \delta_{rel}^2, \quad \alpha = \frac{r_{ci}^2}{E_c(r_{co} - r_{ci})} a_1 \quad (2.1.70)$$

となる。②の条件より、 $\delta_{fc} = 2\delta_{rel}$ のときペレットのリロケーション分の変位は完全になくなり $E_f = E$ となる。よって(2.1.69)、(2.1.70)式より、

$$\delta_c = \frac{Er_{ci}}{E_c(r_{co} - r_{ci}) + Er_{ci}} \cdot 2\delta_{rel} = \alpha(2\delta_{rel})^2 \quad (2.1.71)$$

となり、

$$\alpha = \frac{Er_{ci}}{2\delta_{rel}\{E_c(r_{co} - r_{ci}) + Er_{ci}\}} \quad (2.1.72)$$

を得る。

次に $\delta_{fc} \geq 2\delta_{rel}$ の状態を考える。このとき、条件②より $E_f = E$ (定数) であることから $E_f = \frac{dP_{fc}}{d\delta_{fc}}$ より接触力 P_{fc} は δ_{fc} の 1 次関数として与えられることがわかる。そこで

$$P_{fc} = b_1\delta_{fc} + b_2$$

とおく。上式を(2.1.67)式に代入し、 δ_c について整理すれば、

$$\delta_c = \frac{r_{ci}^2}{E_c(r_{co} - r_{ci})} P_{fc} = \frac{r_{ci}^2 b_1}{E_c(r_{co} - r_{ci})} \left(\delta_{fc} - \frac{b_2}{b_1} \right)$$

となり、 δ_c は、区間 $\delta_{fc} \geq 2\delta_{rel}$ において δ_{fc} の 1 次関数となることがわかる。 b_2/b_1 はペレットのリロケーション分の変位に相当するので $b_2/b_1 = \delta_{rel}$ とおける。 δ_{fc} の係数を β とおけば上式は

$$\delta_c = \beta(\delta_{fc} - \delta_{rel}) \quad , \quad \beta = \frac{r_{ci}^2}{E_c(r_{co} - r_{ci})} b_1 \quad (2.1.73)$$

となる。 $\delta_{fc} = 2\delta_{rel}$ のときペレットのリロケーション分の変位は完全になくなり、 $E_f = E$ となる。よって(2.1.69)、(2.1.73)式より、

$$\delta_c = \frac{Er_{ci}}{E_c(r_{co} - r_{ci}) + Er_{ci}} 2\delta_{rel} = \beta(2\delta_{rel} - \delta_{rel}) \quad (2.1.74)$$

となり、

$$\beta = \frac{2Er_{ci}}{E_c(r_{co} - r_{ci}) + Er_{ci}} \quad (2.1.75)$$

を得る。

これらの関係を図 2.17 に示す。

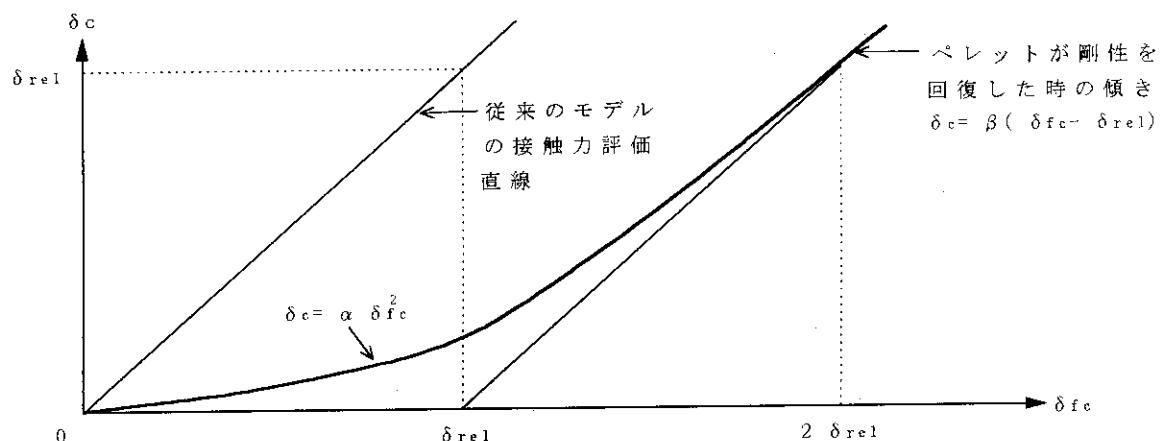


図 2.17 ペレット剛性回復モデル

以上より、ギャップ幅とペレット-被覆管の接触力の関係は

$$\delta_c = \begin{cases} \frac{Er_{ci}}{2\delta_{rel}\{E_c(r_{co} - r_{ci}) + Er_{ci}\}} \delta_{fc}^2 & (0 \leq \delta_{fc} < 2\delta_{rel}) \\ \frac{2Er_{ci}}{E_c(r_{co} - r_{ci}) + Er_{ci}} (\delta_{fc} - \delta_{rel}) & (2\delta_{rel} \leq \delta_{fc}) \end{cases} \quad (2.1.76)$$

$$P_{fc} = E_c \frac{(r_{co} - r_{ci})}{r_{ci}^2} \delta_c \quad (2.1.77)$$

で与えられる。

また、接触力は被覆管が降伏した後は、それ以上には大きくならないものとする。すなわち、被覆管の相当応力が降伏応力 σ_y 以上になった場合は、(2.1.57)式の代わりに、

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

とする。

ここで被覆管の σ_y は、再結晶焼鈍材に対しては、次式を用いる⁽¹⁾。

$$\sigma_y = 21.60 - 0.0213 \times T + \Delta\sigma_{yo}^{irr} \quad (2.1.78)$$

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⁽¹⁾。

$$\sigma_y = 31.32 - 0.0213 \times T + \Delta\sigma_{yo}^{irr} \quad (2.1.79)$$

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⁽¹⁾。

$$\Delta\sigma_{yo}^{irr} = 33.4 [1 - \exp(-c\phi t)]^{\frac{1}{2}} \quad (2.1.80)$$

ここで

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

ϕ : 高速中性子束 ($n/cm^2/s$)

t : 時間 (s)

である。

(4) 割れたペレットの剛性回復

ペレットの割れはペレットのヤング率を変更する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⁽¹⁾。

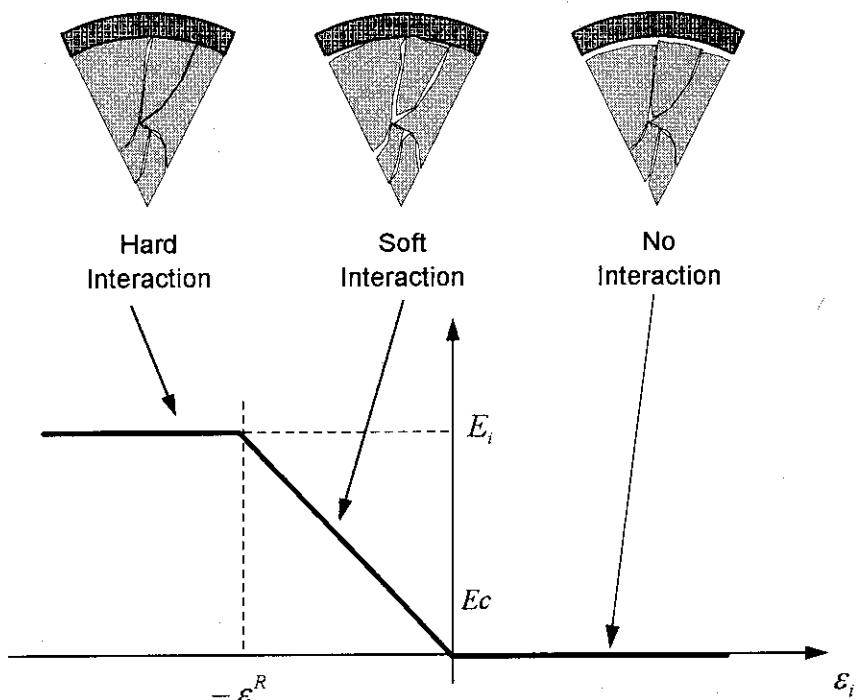


図 2.18 割れたペレットのヤング率

図 2.18 より、主方向 i のヤング率は次のように与えられる。

$$E_i = \begin{cases} E_c & (0 \leq \varepsilon_i) \\ -\frac{E - E_c}{\varepsilon_R} \varepsilon_i + E_c & (-\varepsilon_R < \varepsilon_i < 0) \\ E & (\varepsilon_i \leq -\varepsilon_R) \end{cases} \quad (2.1.81)$$

ここで

ε_R : ペレットが完全に剛性を回復した時のひずみ $\varepsilon_i = -\delta_{fc} / r_{ci}$

である。

ε_R は次のように決定する。

$$\varepsilon_R = (\text{リロケーションひずみ}) + (\text{弾性ひずみ})$$

すなわち、

$$\varepsilon_R = \varepsilon_{rel} + \frac{(-\sigma_R)}{E} \quad (2.1.82)$$

ここで ε_{rel} : リロケーション歪み

$-\sigma_R$: ペレットが完全に剛性を回復したときの応力

E : 本来のペレットヤング率

とする。 (図 2.19 参照)

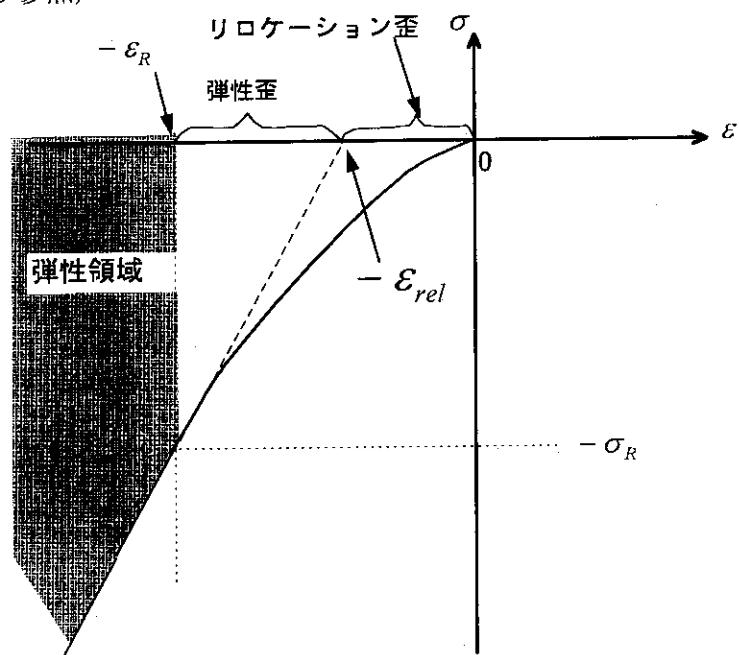


図 2.19 割れたペレットの応力とひずみの関係

(2.1.81)式より、 ε_i が E_i の決定に現れるのは、 $-\varepsilon_R < \varepsilon_i < 0$ の区間だけなので、 $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = E_i$ の

(2.1.81)式より、 ε_i が E_i の決定に現れるのは、 $-\varepsilon_R < \varepsilon_i < 0$ の区間だけなので、 $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = E_i$ の

関係を用いると、

$$\sigma = \frac{E - E_c}{-2\varepsilon_R} \varepsilon_i^2 + E_c \cdot \varepsilon_i \quad (-\varepsilon_R < \varepsilon_i < 0) \quad (2.1.83)$$

である。(2.1.83)式を $\varepsilon_i < 0$ を考慮して解くと、

$$\varepsilon_i = \frac{-E_c + \sqrt{E_c^2 + \frac{2\sigma(E_c - E)}{\varepsilon_R}}}{E_c - E} \quad (2.1.84)$$

である。

(2.1.84)式を(2.1.81)式の区間 $-\varepsilon_R < \varepsilon_i < 0$ に代入して E_i について解くと、

$$E_i = \sqrt{E_c^2 + \frac{2\sigma(E_c - E)}{\varepsilon_R}} \quad (2.1.85)$$

となる。

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

$$\sigma_R = -\frac{\varepsilon_R}{2}(E_c + E) \quad (2.1.86)$$

(2.1.86)式を(2.1.82)式に代入すると、

$$\varepsilon_R = \frac{2E}{E - E_c} \varepsilon_{rel} \quad (2.1.87)$$

非接触時のペレットヤング率は0と仮定しているので $E_c = 0$ より、

$$\varepsilon_R = 2\varepsilon_{rel} \quad (2.1.88)$$

である。

以上をまとめると、 E_f は次のように与えられる。

$$E_f = \frac{E}{2\varepsilon_{rel}} \cdot \frac{\delta_{fc}}{r_{ci}} \quad (\delta_{fc} < 2r_{ci}\varepsilon_{rel})$$

$$E_f = E \quad (\delta_{fc} \geq 2r_{ci}\varepsilon_{rel}) \quad (2.1.89)$$

ここで、リロケーションによるペレット片側変位量については、 $\delta_{rel} = r_{ci}\varepsilon_{rel}$ である。

したがって、たとえばリロケーションパラメータ=0.2で、片側ギャップ幅を $100\mu\text{m}$ の場合、

$\delta_{rel} = 100 \times 0.2 = 20 \mu\text{m}$ であり、 $\delta_{fc} = 40 \mu\text{m} (= 2 \delta_{rel})$ になると剛性を回復することになる。

(5) ペレットリロケーションモデル

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る。FEMAXI-IV 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 2.20 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。

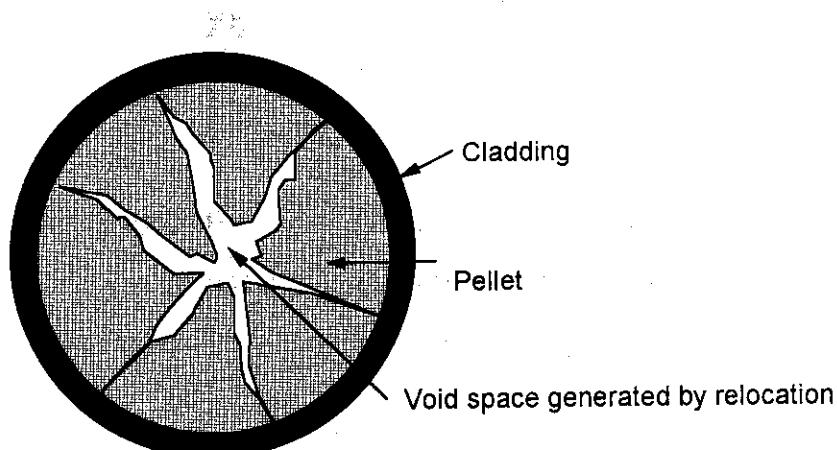


図 2.20 ペレット初期状態のクラック

燃焼が進行するにともないこれらのクラックは徐々に周端部近傍の周方向マイクロクラックに移行し、最終的には、図 2.21 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 2.22 に示すように各体積が燃焼度について線型に変化するように進行すると仮定する。

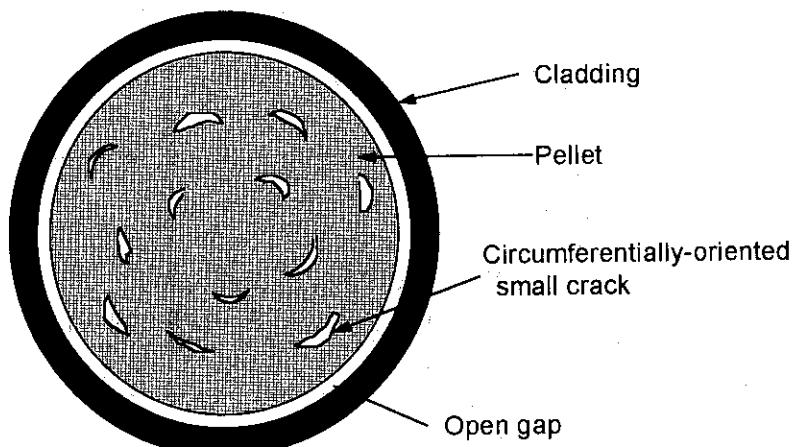


図 2.21 十分燃焼が進んだ後のクラック状態

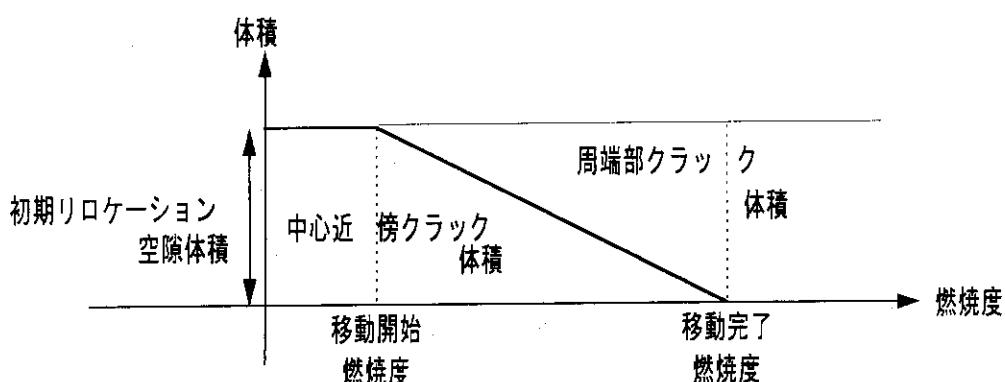


図 2.22 燃焼の進行とリロケーション体積の変化

また、接触力によるペレット体積の縮小は、周端部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ペレットの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・被覆管の重なり (δ_{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、周端部クラック体積の増加に比例して、接触力モデルにおけるリロケーションによるペレット径方向変位量が増加する。よって、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、ペレットのヤング率が変化するモデルに移行する。

移動完了燃焼度に到達すると、リロケーションによるペレット変位量の増加は完了し、ペレットの割れによるみかけの剛性変化は最も緩やかな状態になる。

なお、このモデルは熱計算における接触力評価モデルにのみ適用され、燃料棒全長での力学的ふるまいモデルには適用されない。

FEMAXI-IV 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 で与えることが出来る。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。

2.1.4 FPガス生成・放出

FEMAXI-IV では、ペレットスタックを軸方向に最大 12 セグメントまで分割し、各セグメントについて、径方向を最大 10 領域にまで分割して、FP ガスの生成・放出を計算する。FP ガス放出モデルは、機構論的モデルと温度領域モデルのいづれかを選択する。

オプション選択 IGASP
FP ガス放出モデルオプション： IGASP=0 機構論的モデル、 =1 温度領域モデル

(1) 生成速度

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

$$P^{ij} = \frac{Y \cdot f^{ij} \cdot q^j}{E_f \cdot N_A} \quad (2.1.90)$$

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)

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

$\phi(r)$: 径方向発熱密度分布関数、(2.1.42)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、 3.204×10^{-11} ジュール
(200MeV)

Y : FP ガス $(K_r + X_e)$ の核分裂収率、0.3

N_A : アボガドロ数、 6.02×10^{23}

である。

(2) 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_2 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バブルと粒界ガスバブルの状態を示し、図 2.23(2)に理想化された結晶粒モデルを示す。

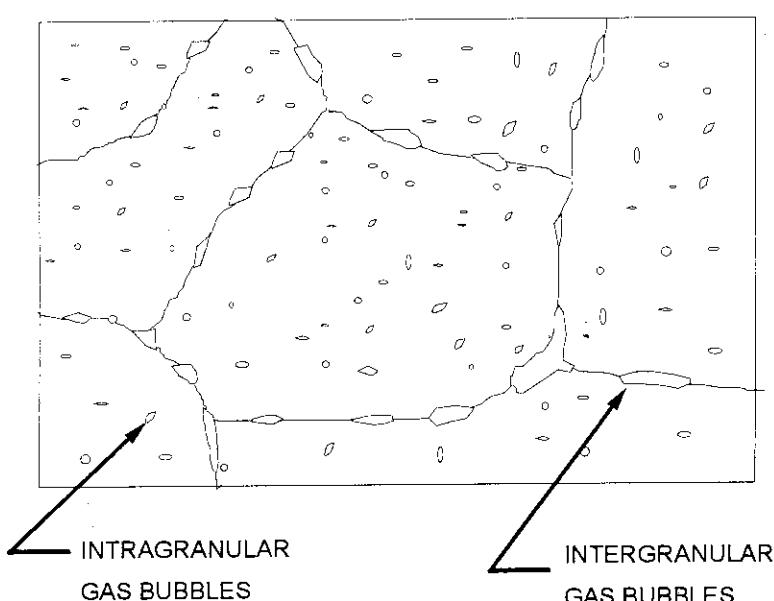


図 2.23(1) ペレット粒内ガスバブルと粒界ガスバブルの状態の模式図

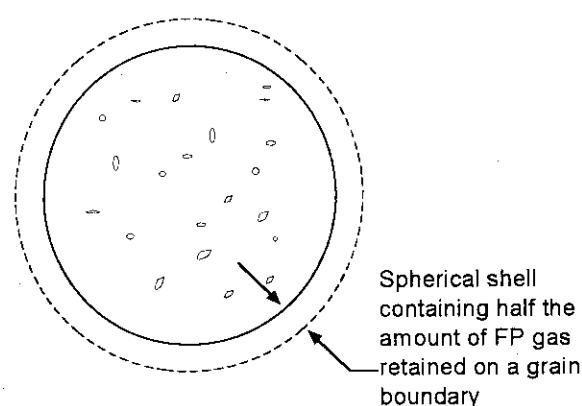


図 2.23(2) ペレット結晶粒理想化モデル

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様に描かれているが、実際の粒界は隣合った結晶粒を分離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量的分配は、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。固体内部に溶解しているガスは濃度勾配を駆動力とした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⁽⁹⁾。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial c}{\partial r} \right) - gc + b'm + \beta \quad (2.1.91)$$

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 (atoms/cm^3)

D : ガス原子の拡散係数 (cm^2/s)

g : 粒内バブルにトラップされるガスの割合 (s^{-1})

b' : 固体内への再溶解率 (s^{-1})

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

β : 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。

ガスの粒内バブルへのトラップと再溶解との平衡は次式で表される。

$$\frac{\partial m}{\partial t} = gc - b'm \quad (2.1.92)$$

平衡状態において、 m の時間変化が無視されるとき、(2.1.92)式は、

$$gc = b'm \quad (2.1.93)$$

と簡略化される。そこで(2.1.91)式および(2.1.92)式を辺々加えると、

$$\frac{\partial(c+m)}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2(c+m)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial(c+m)}{\partial r} \right) + \beta \quad (2.1.94)$$

となる。ところで(2.1.93)式より、

$$c+m = \frac{b'+g}{b'} c \quad (2.1.95)$$

の関係が得られる。これを(2.1.94)式に代入すると、

$$\frac{\partial(c+m)}{\partial t} = \frac{Db'}{b'+g} \left(\frac{\partial^2(c+m)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial(c+m)}{\partial r} \right) + \beta \quad (2.1.96)$$

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

$$\Psi = c + m \quad (2.1.97)$$

で表せば、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。

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = D' \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right) + \beta \quad (2.1.98)$$

ここで

$$D' = \frac{b'D}{b'+g} \quad (2.1.99)$$

である。 Ψ 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関係なく、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、(2.1.98)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} の粒内バブルが N 個存在すると仮定し、 N を求める。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⁽¹⁰⁾。

$$N = 1.52\alpha / \pi\lambda(\bar{R} + Z_o)^2 \quad (2.1.100)$$

ここで、

N : 粒内バブル密度 (*bubbles/cm³*)

\bar{R} : 粒内バブル平均半径 (cm)

Z_o : 影響範囲(cm)

α : バブルの生成率 (= 24 bubbles/fission fragment)

λ : 飛程 (= 6×10^{-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⁽¹¹⁾。

$$g = 4\pi D\bar{R}N, \quad (2.1.101)$$

\bar{R} : 粒内バブル平均半径 (cm),

N : 粒内バブル数密度 (*bubbles/cm³*)

固相への再溶解率は次式で与えられる⁽¹⁰⁾。

$$b' = 3.03F\pi\lambda(\bar{R} + Z_0)^2 \quad (2.1.102)$$

ここで、

F : 核分裂速度(fissions/cm³/sec)

λ : 飛程 (= 6×10^{-4} 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。

$$b' = b' \times BFCT \quad (\text{標準値 } 1.0)$$

である。

粒内バブル平均半径 \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

$$\left(P_0 + \frac{2\gamma}{\bar{R}} \right) (V - m^* B) = m^* kT \quad (2.1.103)$$

と書く。ここで、

\bar{R} : 粒内バブル平均半径(cm)

P_0 : 粒内バブルに加わる外力(dyn/cm²)

γ : 表面張力(626 erg/cm²)

V : 粒内バブル体積($= \frac{4}{3}\pi\bar{R}^3$ cm³)

B : ファン・デル・ワールス定数($= 8.5 \times 10^{-23}$ cm³/atom)

m^* : 1バブル当たりのガス原子数(atoms/bubble)

k : ボルツマン定数($= 1.38 \times 10^{-16}$ 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 (2.1.103)式を m^* について解けば

$$m^* = \frac{8\pi\gamma\bar{R}}{3(2\gamma B + kT\bar{R})} \quad (2.1.104)$$

となる。(2.1.104)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、

$$m^* = \frac{4\pi\gamma\bar{R}}{3B} \quad (2.1.105)$$

を得る。一方、トラップと再溶解の平衡関係式(2.1.93)式、

$$gc = b'm \quad (2.1.94)$$

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

$$(b' + g)m^*N = g\Psi \quad (2.1.106)$$

となる。(2.1.106)式に(2.1.101)、(2.1.102)、(2.1.105)式をそれぞれ代入すると、

$$\left(3.03F\pi\lambda(\bar{R} + Z_0)^2 + 4\pi D\bar{R}N\right)\frac{\bar{R}^2}{3B} = D\Psi \quad (2.1.107)$$

となる。さらに(2.1.100)式を代入して整理すれば、 \bar{R} についての方程式、

$$\frac{3.03F\pi\lambda(\bar{R} + Z_0)^2\bar{R}^2}{3B} + \frac{4D \cdot 1.52\alpha\bar{R}^3}{3B\lambda(\bar{R} + Z_0)^2} - D\Psi = 0 \quad (2.1.108)$$

を得る。拡散係数 D は Turnbull らにより次式で与えられている⁽¹²⁾。

$$D = 7.6 \times 10^{-10} \exp(-7 \times 10^4 / RT) + S^2 j\nu V + 2 \times 10^{-40} F \quad (m^2 / s) \quad (2.1.109)$$

ここで

R : ガス定数 = 1.987 cal/mole/K

T : 温度 ($^{\circ}\text{K}$)

S : 原子ジャンプ距離 = $\Omega^{\frac{2}{3}}$

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

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

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

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

$Z = 2 \quad (\text{欠損点数})$

$K' = 10^4 \quad (\text{原子当りの欠損率})$

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

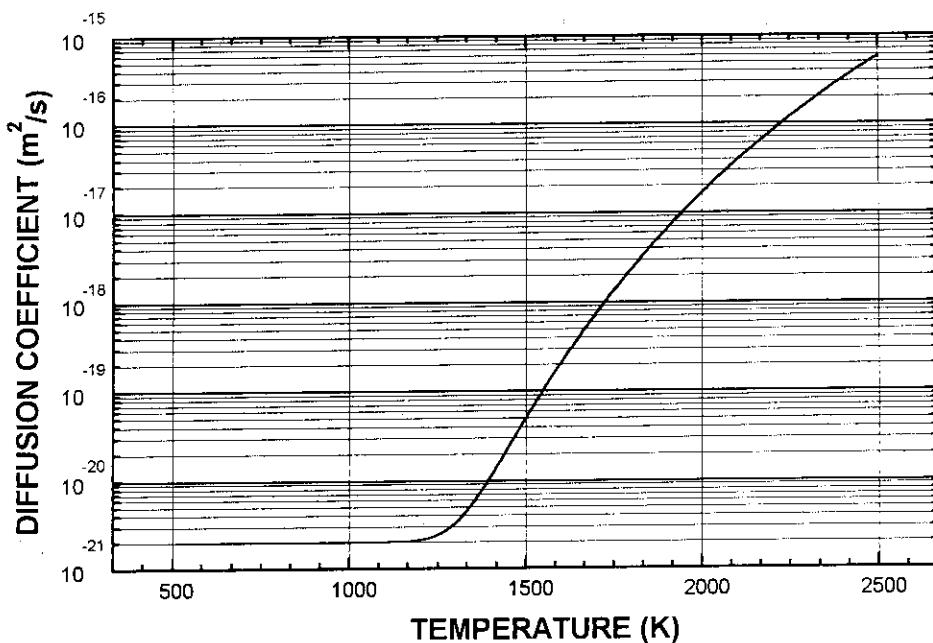
$F = 10^{19} \left(\text{fission} / m^3 / \text{sec}, \text{核分裂速度} \right)$

調整パラメータ FACD

拡散係数は FACD により調整できる。(標準値 1.0)
 $D = D \times FACD$

である。

拡散係数 D の温度依存性を図 2.24 に示す。

図 2.24 拡散係数 D の温度依存性

(2) - 3 偏微分方程式の解法

偏微分方程式(2.1.98)の解法には、Galerkin の重み付き残差法による有限要素法を用いる。

(2.1.98)式を、

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} - D' \nabla^2 \Psi - \beta = 0 \quad (2.1.110)$$

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、 Ψ_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。

$$\int_V R_\Psi(t, r) \phi_i dV = 0 \quad (2.1.111)$$

任意の重み関数 ϕ_i に対して(2.1.111)式を満足するためには、 $R_\Psi(t, r) = 0$ であることが必要で

るので、(2.1.111)式は(2.1.110)式と等価である。(2.1.111)式の積分を行うと、

$$\int_V \left(\frac{\partial \hat{\Psi}}{\partial t} - D' \nabla^2 \hat{\Psi} - \beta \right) \phi_i dV = 0$$

$$\int_V \left(\frac{\partial \hat{\Psi}}{\partial t} - \beta \right) \phi_i dV - \int_V D' \nabla^2 \hat{\Psi} \phi_i dV = 0 \quad (2.1.112)$$

となる。(2.1.112)式の左辺第2項は、

$$-\int_V D' \nabla^2 \hat{\Psi} \phi_i dV = -D' \left[\int_V \nabla \cdot (\phi_i \nabla \hat{\Psi}) dV - \int_V (\nabla \hat{\Psi}) \cdot (\nabla \phi_i) dV \right]$$

$$= -D' \int_{\partial V} \phi_i \nabla \hat{\Psi} \cdot d\vec{s} + D' \int_V (\nabla \hat{\Psi}) \cdot (\nabla \phi_i) dV$$

と書ける。ここで、重み関数として粒境界 ∂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、(2.1.112)式は、

$$\int_V \left(\frac{\partial \hat{\Psi}}{\partial t} - \beta \right) \phi_i dV + D' \int_V (\nabla \hat{\Psi}) \cdot (\nabla \phi_i) dV = 0 \quad (2.1.113)$$

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 に対して(2.1.113)式は、

$$\sum_j (\hat{\Psi}_j E_{ji} + D' \Psi_j A_{ji}) - \beta H_i = 0 \quad (2.1.114)$$

となる。ここで、

$$E_{ji} = \int_{V_e} \phi_j \phi_i dV$$

$$A_{ji} = \int_{V_e} \frac{\partial \phi_i}{\partial \sigma} \frac{\partial \phi_j}{\partial \sigma} dV \int_{V_e}$$

$$H_i = \int_{V_e} \phi_i dV$$

である。

基本関数 ϕ_j として、次の二次関数を考える。

$$\phi_1(\xi) = -\frac{1}{2} \xi (1 - \xi)$$

$$\phi_2(\xi) = 1 - \xi^2$$

$$\phi_3(\xi) = \frac{1}{2} (1 + \xi) \quad (2.1.115)$$

これらの基本関数を用いれば、(2.1.114)式中の E_{ji} , A_{ji} , H_i は、要素 V_e の中点座標を R_k , 要素幅の $1/2$ を ΔR として

$$\begin{aligned}
E_{ji} &= \int_{V_e} \phi_j \phi_i dV = 4\pi \int_{R_k - \Delta R}^{R_k + \Delta R} \phi_j \phi_i r^2 dr \\
&= 4\pi \Delta R \int_{-1}^1 \phi_j \phi_i (R_k + \Delta R \xi)^2 d\xi \\
A_{ji} &= \int_{V_e} \frac{\partial \phi_i}{\partial r} \frac{\partial \phi_j}{\partial r} dV = 4\pi \int_{R_k - \Delta R}^{R_k + \Delta R} \frac{\partial \phi_i}{\partial r} \frac{\partial \phi_j}{\partial r} r^2 dr \\
&= \frac{4\pi}{\Delta R} \int_{-1}^1 \frac{\partial \phi_i}{\partial \xi} \frac{\partial \phi_j}{\partial \xi} (R_k + \Delta R \xi)^2 d\xi \\
H_i &= \int_{V_e} \phi_i dV = 4\pi \int_{R_k - \Delta R}^{R_k + \Delta R} \phi_i r^2 dr = 4\pi \Delta R \int_{-1}^1 \phi_i (R_k + \Delta R \xi)^2 d\xi
\end{aligned} \tag{2.1.116}$$

となる。

次に、(2.1.114)式を陰解法形式で表すと、(Qは定数)

$$\sum_j \left\{ \frac{\Psi_j^{n+1} - \Psi_j^n}{\Delta t} E_{ij} + D^* ((1-\theta)\Psi_j^n + \theta\Psi_j^{n+1}) A_{ji} \right\} - \beta^* H_i = 0 \tag{2.1.117}$$

ここで、

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

θ : 陰解法におけるタイムステップ間での補間パラメータ ($0 \leq \theta \leq 1$)

である。

(2.1.117)式について未知数と既知数を整理すれば、

$$\sum_j \left(\frac{1}{\Delta t} E_{ij} + D^* \theta A_{ji} \right) \Psi_j^{n+1} = \sum_j \left(\frac{1}{\Delta t} E_{ij} - D^* (1-\theta) A_{ji} \right) \Psi_j^n + \beta^* H_i \tag{2.1.118}$$

したがって、要素マトリクス W_{ij} 、および要素ベクトル 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。

次に、全要素についてこれらの要素を重ね合わせ、表面における $\Psi^{n+1} = 0$ の条件を与えて、

$$[W_{ij}] \{ \Psi_j^{n+1} \} = \{ Q_i \} \tag{2.1.119}$$

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。

$$f_g = \left(\frac{a^{n+1}}{a^n} \right)^3 - 1 \quad (2.1.120)$$

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。粒成長モデルとしては、修正

Ainscough モデルとして次式を標準的に用いる⁽¹³⁾。

$$\frac{da}{dt} = K \left(\frac{1 - \frac{1 + N_f / N_f^{\max}}{a_m}}{a} \right) \quad (\mu m/h) \quad (2.1.121)$$

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

a : 現タイムステップでの粒径 (μm),

a_m : 最大限 ($= 2.23 \times 10^3 \exp(-7620 / T)$) (μm),

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 ($atoms/cm^2$)。ただし、 N_f は後述の(2.1.129)式、

N_f^{\max} は後述の(2.1.131)式で与える。

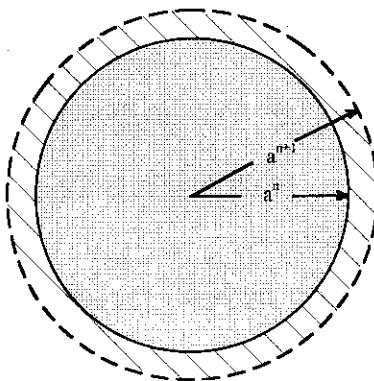


図 2.25 粒成長概念,

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できる。

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

2) 粒成長速度 $\frac{da}{dt} = \frac{da}{dt} \times GRWF$ (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 IGRRAIN により
次のように選択される。IGRAIN=0: 上記標準モデル、=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、タイムステップ n から $n+1$ の間に粒成長が起こった場合には、粒内の要素をリメッシュする。

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半径方向座標値は、

$$r^{n+1} = \frac{a^{n+1} - 2\Delta R}{a^n - 2\Delta R} r^n \quad (2.1.122)$$

となる。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半径方向座標は、それぞれ $a^{n+1} - 2\Delta R$ 、
 $a^{n+1} - \Delta R$ 、 a^{n+1} として与える。

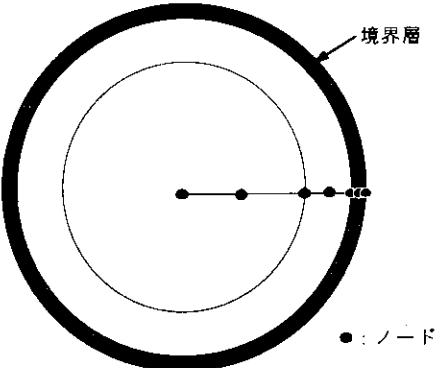


図 2.26 ベレット粒内メッシュ

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 10.1 である。
これは第 1 層と第 2 層の要素幅の比が 10:1 であることを意味する。

このとき、リメッシュした座標での FP ガス濃度 Ψ については、

$$\Psi^{n+1, 0}(r) = \Psi^n(r) \quad (0 \leq r \leq a^n) \quad (2.1.123)$$

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

とする。ここで、

$\Psi^{n+1, 0}(r)$: 粒成長後の FP ガス濃度の、タイムステップ $n \rightarrow n+1$ の
変化を計算するときの初期濃度分布

$\Psi^n(r)$: 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は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。

$$\left(\frac{a^{n+1}}{a^n}\right)^3 \left(\bar{\Psi}_{total}^n + 4\pi a^{n^2} N_f^n\right) = \bar{\Psi}_{total}^n + 4\pi a^{(n+1)^2} N_f^{n+1,0} \quad (2.1.124)$$

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りの、粒成長以前の FP ガス原子数濃度 (atoms/cm²)

である。ただし、 $N_f^0 = 0$ である。

(2.1.124)式を $N_f^{n+1,0}$ について解くと、

$$N_f^{n+1,0} = \frac{f_g \bar{\Psi}_{total}^n}{4\pi a^{(n+1)^2}} + \frac{a^{n+1}}{a^n} N_f^n \quad (2.1.125)$$

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(2.1.123)式とを用い、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FPガス原子の再溶解モデルにおいては、粒界は隣合った結晶粒を分離しているので、粒界の単位面積当りの半分のFPガスが再溶解すると仮定する。すなわち、

$$\frac{bN_f}{2} \cdot (ADDF) \quad (\text{atoms}/\text{cm}^2/\text{s}) \quad (2.1.126)$$

ここで、

b : 再溶解率 ($10^{-6}/\text{s}$) である。

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境界層の厚みを制御するパラメータであり、境界層の厚みを指定する。標準値は $2 \times 10^{-8} \text{ cm}$ 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 ガスが生成したことと等価である。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 β' を与えることで再溶解をモデル化する。そこで、 β' を以下のように与える。

$$\beta' = \frac{b}{2} \left\{ (1-\theta) N_f^n + \theta N_f^{n+1} \right\} \frac{1}{2\Delta R} (\cdot ADDF) \quad (\text{atoms}/\text{cm}^3/\text{sec}) \quad (2.1.127)$$

ここで、

N_f^n : タイムステップ n での粒界の FP ガス原子数濃度(atoms/cm²)

N_f^{n+1} : タイムステップ n+1 での粒界の FP ガス原子数濃度(atoms/cm²)

θ : 陰解法におけるタイムステップ間の補間パラメータ ($0 \leq \theta \leq 1$)

ただし、 N_f^n および N_f^{n+1} の値は、粒成長の有無にはよらない。

したがって、(2.1.91)式中 β は境界層においては、

$$\tilde{\beta} = \beta + \beta' \quad (2.1.128)$$

として、 $\tilde{\beta}$ を FP ガス生成率とする。

N_f^{n+1} については、

$$N_f^{n+1} = \frac{a^{n+1}}{a^n} N_f^n + \frac{(1 + f_g) \bar{\Psi}_{total}^n - \bar{\Psi}_{total}^{n+1} + \int_V \beta \Delta t dv}{4\pi a^{n+1^2}} \quad (2.1.129)$$

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、 $\int_V dv = \frac{4}{3} \pi a^{n+1^3}$ 。

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

$$\bar{\Psi}_{total}^{n+1} = \sum_{e=1}^3 \int_{V_e} 4\pi r^2 \hat{\Psi}^{n+1}(r) dr, \quad (2.1.130)$$

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

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ある値 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⁽¹⁰⁾。

$$N_f^{\max} = \frac{4r_f f_f(\vartheta)}{3kT \sin^2 \vartheta} f_b \left\{ \frac{2\gamma}{r_f} + P_{ext} \right\} \quad (2.1.131)$$

ここで、

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

N_f^{\max} : 粒界での単位面積あたりのガス原子数の飽和値 (*atoms/cm²*)

r_f : 粒界でのガスバブルの半径 (= 0.5×10^{-4} cm)

$f_f(\vartheta)$: 球体積に対するレンズ状バブル体積比

ϑ : レンズ状バブル角 (= 50°)

k : ボルツマン定数 (= 1.38×10^{-16} erg/k)

T : 溫度 (° K)

γ : 表面張力 (= 626 erg/cm²)

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 (dyne/cm²)

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

$$T - T_s = (T_c - T_s) \left\{ 1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right\} \quad (2.1.132)$$

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

$$\sigma_r = \frac{E}{4(1-\nu)} a(T_c - T_s) \left\{ \left(\frac{r}{R} \right)^2 - 1 \right\} - P_i \quad (2.1.133)$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{E}{4(1-\nu)} a(T_c - T_s) \left\{ 3 \left(\frac{r}{R} \right)^2 - 2 \right\} - P_i \quad (2.1.134)$$

$$\sigma_z = \frac{E}{4(1-\nu)} a(T_c - T_s) \left\{ 4 \left(\frac{r}{R} \right)^2 - 1 \right\} - P_i \quad (2.1.135)$$

となる。ここで

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

E : ヤング率

ν : ポアソン比

a : 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触圧力に等しい($P_f = P_i$)とする。

平均応力 $\bar{\sigma}$ は、

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{3} (\sigma_r + \sigma_{\theta} + \sigma_z) \quad (2.1.136)$$

とする。

以下、プログラム中での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 $\sigma_{r,0}$ 、 $\sigma_{\theta,0}$ 、 $\sigma_{z,0}$ はプロセスガス圧とする。(2.1.133)、(2.1.134)、(2.1.135)式を用いてタイムステップ間での熱応力増分は

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{r,n+1}^{th} &= \frac{E_{n+1}}{4(1-\nu)} a_{n+1} (T_{c,n+1} - T_{s,n+1}) \left\{ \left(\frac{r}{R} \right)^2 - 1 \right\} - P_{i,n+1} \\ &\quad - \left\{ \frac{E_n}{4(1-\nu)} a_n (T_{c,n} - T_{s,n}) \left\{ \left(\frac{r}{R} \right)^2 - 1 \right\} - P_{i,n} \right\} \end{aligned} \quad (2.1.137)$$

$$\Delta\sigma_{\theta,n+1}^{th} = \frac{E_{n+1}}{4(1-\nu)} a_{n+1} (T_{c,n+1} - T_{s,n+1}) \left\{ \left(3 \frac{r}{R} \right)^2 - 2 \right\} - P_{i,n+1} \\ - \left\{ \frac{E_n}{4(1-\nu)} a_n (T_{c,n} - T_{s,n}) \left\{ \left(3 \frac{r}{R} \right)^2 - 2 \right\} - P_{i,n} \right\} \quad (2.1.138)$$

$$\Delta\sigma_{z,n+1}^{th} = \frac{E_{n+1}}{4(1-\nu)} a_{n+1} (T_{c,n+1} - T_{s,n+1}) \left\{ 4 \left(\frac{r}{R} \right)^2 - 1 \right\} - P_{i,n+1} \\ - \left\{ \frac{E_n}{4(1-\nu)} a_n (T_{c,n} - T_{s,n}) \left\{ 4 \left(\frac{r}{R} \right)^2 - 1 \right\} - P_{i,n} \right\} \quad (2.1.139)$$

と求められる。

第 $n+1$ ステップでの応力の第 0 近似値を

$$\sigma_{r,n+1}^0 = \sigma_{r,n} + \Delta\sigma_{r,n+1}^{th} \quad (2.1.140)$$

$$\sigma_{\theta,n+1}^0 = \sigma_{\theta,n} + \Delta\sigma_{\theta,n+1}^{th} \quad (2.1.141)$$

$$\sigma_{z,n+1}^0 = \sigma_{z,n} + \Delta\sigma_{z,n+1}^{th} \quad (2.1.142)$$

とおく。(2.1.140)、(2.1.141)、(2.1.142)式を(2.1.136)式に代入すれば平均応力の第 0 近似値 $\bar{\sigma}_{n+1}^0$ は

$$\bar{\sigma}_{n+1}^0 = \frac{1}{3} (\sigma_{r,n+1}^0 + \sigma_{\theta,n+1}^0 + \sigma_{z,n+1}^0) \quad (2.1.143)$$

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

$$\bar{\sigma}_{n+1}^0 = P_{gas,n+1} \quad (2.1.144)$$

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

$$\bar{\sigma}_{n+1}^0 = \sigma_{Y,n+1} \quad (2.1.145)$$

とおく。

次に相当応力 σ_{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。

クリープひずみ増分は

$$\Delta\bar{\varepsilon}_{n+1}^c = f(T, \sigma_{eq}, G, f_d, \dot{F}) \cdot \alpha \cdot \Delta t \quad (2.1.146)$$

で与えられる。ここで

T : 温度

σ_{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 α : ホットプレスパラメータ Δt : タイムステップ幅

である。

このようにして求めた $\Delta \bar{\varepsilon}_{n+1}^c$ を用いて

$$\bar{\sigma}_{n+1}^1 = \bar{\sigma}_{n+1}^0 + E \Delta \varepsilon_{n+1}^c \quad (2.1.147)$$

より平均応力の第1近似値 $\bar{\sigma}_{n+1}^1$ を求められる。以降ニュートン・ラプソン法を用いて σ_{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）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

$$\begin{aligned} \sigma_{r,n+1} &= \sigma_{r,n} + \Delta \sigma_{r,n+1}^{th} + E \Delta \varepsilon_{n+1}^c \\ \sigma_{\theta,n+1} &= \sigma_{\theta,n} + \Delta \sigma_{\theta,n+1}^{th} + E \Delta \varepsilon_{n+1}^c \\ \sigma_{z,n+1} &= \sigma_{z,n} + \Delta \sigma_{z,n+1}^{th} + E \Delta \varepsilon_{n+1}^c \end{aligned} \quad (2.1.148)$$

として求められる。

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。 | $P_{ext}=0$ | $P_{ext}=1$ | $P_{ext}=2$ | $P_{ext}=3$ |
| $P_{ext}=1$ | = プレナム圧、 | $P_{ext}=2$ | = ペレット被覆管間接触圧、 | $P_{ext}=3$ |
| $P_{ext}=11$ | = 热応力(プレナム圧を考慮)、 | $P_{ext}=12$ | = 热応力(ペレット被覆管間接触圧を考慮)、 | $P_{ext}=13$ |
| $P_{ext}=13$ | = 热応力(プレナム圧、接触圧を考慮)、 | $P_{ext}=14$ | = 詳細な力学解析(I)の応力計算で求めた平均応力。 | |
| ただし、詳細な力学解析(II)を用いた場合は、IPEXT=13 と同様の結果となる。 | | | | |

(2)-6 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う。この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 ΔR_2 を用いて、

$$\Delta t = \frac{\Delta R_2^2}{D'} \times 0.05 \times FMULT \quad (2.1.149)$$

と与える。

調整パラメータ FMULT タイムステップ幅調整パラメータ。標準値=1.0。

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っ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 / m³)

D^{12} : 相互拡散定数 (m² / s) ($D^{12} = D^{21}$)

T : 温度 (K)

V : 体積 (m³)

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 2.27 のようにモデル化することができる。

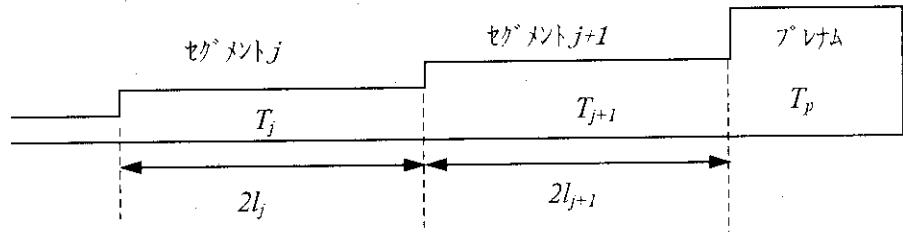


図 2.27 ガス拡散・流動モデル

セグメント j においてガス i の総量は

$$\begin{aligned} N_{i,j} &= n_{i,j} V_j \\ &= C_{i,j} n_j V_j = \frac{P}{R} C_{i,j} \frac{V_j}{T_j} \end{aligned} \quad (2.1.150)$$

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 境界 * を越えて $j+1$ に流入するガス 1(Xe)の量 $G_1(j \rightarrow j+1)$ を求める。セグメント j から * を越えて流出するガス 1(Xe)の量は、Fick の法則により、

$$G_1(j \rightarrow *) = S_j D_j^{12} \frac{n_{1,j} - n_{1,*}}{l_j} \quad (2.1.151)$$

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

$$G_1(*) \rightarrow j+1 = S_{j+1} D_{j+1}^{12} \frac{n_{1,*} - n_{1,j+1}}{l_{j+1}} \quad (2.1.152)$$

と書ける。連続性の条件により

$$G_1(j \rightarrow *) = G_1(*) \rightarrow j+1$$

が成り立つことから

$$S_j D_j^{12} \frac{n_{1,j} - n_{1,*}}{l_j} = S_{j+1} D_{j+1}^{12} \frac{n_{1,*} - n_{1,j+1}}{l_{j+1}} \quad (2.1.153)$$

を得る。これを $n_{1,*}$ について解けば

$$n_{1,*} = \frac{S_j D_j^{12} l_{j+1} n_{1,j} + S_{j+1} D_{j+1}^{12} l_j n_{1,j+1}}{S_{j+1} D_{j+1}^{12} l_j + S_j D_j^{12} l_{j+1}} \quad (2.1.154)$$

となる。(2.1.134)式を用いることにより

$$G_1(j \rightarrow j+1) = G_1(j \rightarrow *) \\ = \frac{S_j D_j^{12} S_{j+1} D_{j+1}^{12}}{S_{j+1} D_{j+1}^{12} l_j + S_j D_j^{12} l_{j+1}} (n_{1,j} - n_{1,j+1}) \quad (2.1.155)$$

を得る。ここで

$$F_{j,j+1} = \frac{S_j D_j^{12} S_{j+1} D_{j+1}^{12}}{S_{j+1} D_{j+1}^{12} l_j + S_j D_j^{12} l_{j+1}} \quad (2.1.156)$$

として

$$G_1(j \rightarrow j+1) = F_{j,j+1} (n_{1,j} - n_{1,j+1}) \quad (2.1.157)$$

の様に書く。

一方、ガス 2 (He) についても同様に

$$G_2(j \rightarrow j+1) = F_{j,j+1} (n_{2,j} - n_{2,j+1}) \quad (2.1.158)$$

を得る。

(2.1.157)式と(2.1.158)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。

$$G(j \rightarrow j+1) = F_{j,j+1} (n_j - n_{j+1}) \quad (2.1.159)$$

ここで、

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

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

$$n_j \neq n_{j+1} \quad (2.1.160)$$

である。しかるに(2.1.159)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仮想的に生じてしまう。

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(2.1.159)式及び(2.1.160)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。

(2.1.159)式に加えるべき第 2 項は、

$$G(j \rightarrow j+1) = F_{j,j+1} \left\{ (n_j - n_{j+1}) - (\bar{n}_j - \bar{n}_{j+1}) \right\} \quad (2.1.161)$$

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

$$\bar{n}_j = \frac{P}{R} \frac{1}{T_j}, \quad \bar{n}_{j+1} = \frac{P}{R} \frac{1}{T_{j+1}} \quad (2.1.162)$$

で与えられる。

各成分についての流量、(2.1.157)式及び(2.1.158)式はそれぞれ

$$G_1(j \rightarrow j+1) = F_{j,j+1} \left\{ (n_{1,j} - n_{1,j+1}) - (\bar{n}_{1,j} - \bar{n}_{1,j+1}) \right\} \quad (2.1.163)$$

$$G_2(j \rightarrow j+1) = F_{j,j+1} \left\{ (n_{2,j} - n_{2,j+1}) - (\bar{n}_{2,j} - \bar{n}_{2,j+1}) \right\} \quad (2.1.164)$$

となる。ここで、

$$\bar{n}_{1,j} = \frac{P}{R} \frac{\bar{C}_1}{T_j}, \quad \bar{n}_{1,j+1} = \frac{P}{R} \frac{\bar{C}_1}{T_{j+1}} \quad (2.1.165)$$

$$\bar{C}_1 = \frac{N_{1,j} + N_{1,j+1}}{V_j + V_{j+1}} = \frac{n_{1,j} V_j + n_{1,j+1} V_{j+1}}{V_j + V_{j+1}} \quad (2.1.166)$$

$$\bar{n}_{2,j} = \frac{P}{R} \frac{\bar{C}_2}{T_j}, \quad \bar{n}_{2,j+1} = \frac{P}{R} \frac{\bar{C}_2}{T_{j+1}} \quad (2.1.167)$$

$$\bar{C}_2 = \frac{N_{2,j} + N_{2,j+1}}{V_j + V_{j+1}} = \frac{n_{2,j} V_j + n_{2,j+1} V_{j+1}}{V_j + V_{j+1}} \quad (2.1.168)$$

$$\bar{C}_1 + \bar{C}_2 = 1 \quad (2.1.169)$$

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 (キセノン) の流束 $J_{1,R}$ は、

$$J_{1,R} = F_{j-1,j} \left\{ (n_{1,j-1} - n_{1,j}) - (\bar{n}_{1,j-1} - \bar{n}_{1,j}) \right\} \quad (2.1.170)$$

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 (キセノン) の流束 $J_{1,S}$ は、

$$J_{1,S} = F_{j+1,j} \left\{ (n_{1,j} - n_{1,j+1}) - (\bar{n}_{1,j} - \bar{n}_{1,j+1}) \right\} \quad (2.1.171)$$

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

$$V_j \frac{\partial n_{1,j}}{\partial t} = J_{1,R} - J_{1,S} \quad (2.1.172)$$

となる。

(2.1.172)式を(2.1.170)および(2.1.171)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。

$$\frac{n_{1,j}^{k+1} - n_{1,j}^k}{\Delta t} = \frac{1}{V_j^{\theta_1}} \left\{ F_{j-1,j}^{\theta_1} \left[(n_{1,j-1}^{\theta_2} - n_{1,j}^{\theta_2}) - (\bar{n}_{1,j-1}^{\theta_1} - \bar{n}_{1,j}^{\theta_1}) \right] - F_{j-1,j}^{\theta_1} \left[(n_{1,j}^{\theta_2} - n_{1,j+1}^{\theta_2}) - (\bar{n}_{1,j}^{\theta_1} - \bar{n}_{1,j+1}^{\theta_1}) \right] \right\} \quad (2.1.173)$$

ここで、

θ_1 = ガスの温度、容積、圧力、平衡モル比に関する軸方向収束ループ内

補間パラメータ

θ_2 = ガスのモル濃度に関する相互拡散計算における補間パラメータ

である。 θ_1 は軸方向収束ループ内では変化するが、相互拡散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

θ_1, θ_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、 θ_2 についての補間式、

$$n_{1,j}^{\theta_2} = (1 - \theta_2) n_{1,j}^k + \theta_2 n_{1,j}^{k+1} \quad (2.1.174)$$

なる関係を(2.1.156)式に代入して整理すると、

$$\begin{aligned} \frac{n_{1,j}^{k+1} - n_{1,j}^k}{\Delta t} &= \frac{\theta_2 F_{j-1,j}^q}{V_j^q} n_{1,j-1}^{k+1} - \frac{\theta_2 \{ F_{j,j+1}^q + F_{j-1,j}^q \}}{V_j^q} n_{1,j}^{k+1} \\ &+ \frac{\theta_2 F_{j-1,j}^q}{V_j^q} n_{1,j+1}^{k+1} + \frac{1}{V_j^q} \left\{ F_{j-1,j}^q \left[(1 - \theta_2) (n_{1,j-1}^k - n_{1,j}^k) \right. \right. \\ &\left. \left. - (\bar{n}_{1,j-1}^q - \bar{n}_{1,j}^q) \right] - F_{j,j+1}^q \left[(1 - \theta_2) (n_{1,j}^k - n_{1,j+1}^k) - (\bar{n}_{1,j}^q - \bar{n}_{1,j+1}^q) \right] \right\} \end{aligned} \quad (2.1.175)$$

となる。(2.1.175)式を整理して

$$A_j n_{1,j-1}^{k+1} + B_j n_{1,j}^{k+1} + C_j \cdot n_{1,j+1}^{k+1} = D_j \quad (2.1.176)$$

の形に書く。ここで、

$$A_j = - \frac{\theta_2 F_{j-1,j}^{\theta_1}}{V_j^{\theta_1}} \Delta t \quad (2.1.177)$$

$$B_j = 1 + -\frac{\theta_2 \{ F_{j-1,j}^{\theta_1} + F_{j,j+1}^{\theta_1} \}}{V_j^{\theta_1}} \Delta t \quad (2.1.178)$$

$$C_j = -\frac{\theta_2 F_{j,j+1}^{\theta_1}}{V_j^{\theta_1}} \Delta t \quad (2.1.179)$$

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

である。

ここで、最上部および最下部セグメント(プレナムも含む)について考える。

最下部の第1セグメントでは境界面 R はないため

$$\begin{aligned} V_1 \frac{\partial n_{1,1}}{\partial t} &= -J_{1,S} \\ &= -F_{1,2} [(n_{1,1} - n_{1,2}) - (\bar{n}_{1,1} - \bar{n}_{1,2})] \end{aligned} \quad (2.1.180)$$

である。したがって

$$\begin{aligned} \frac{n_{1,1}^{k+1} - n_{1,1}^k}{\Delta t} &= -\frac{\theta_2 F_{1,2}^{\theta_1}}{V_1^{\theta_1}} n_{1,1}^{k+1} + \frac{\theta_2 F_{1,2}^{\theta_1}}{V_1^{\theta_1}} n_{1,2}^{k+1} - \frac{(1 - \theta_2) F_{1,2}^{\theta_1}}{V_1^{\theta_1}} n_{1,1}^k \\ &\quad + \frac{(1 - \theta_2) F_{1,2}^{\theta_1}}{V_1^{\theta_1}} n_{1,2}^k + \frac{F_{1,2}^{\theta_1}}{V_1^{\theta_1}} (\bar{n}_{1,1}^{\theta_1} - \bar{n}_{1,2}^{\theta_1}) \end{aligned} \quad (2.1.181)$$

となる。この式を

$$\begin{aligned} B_1 &= 1 + \frac{\theta_2 F_{1,2}^{\theta_1}}{V_1^{\theta_1}} \Delta t, C_1 = -\frac{\theta_2 F_{1,2}^{\theta_1}}{V_1^{\theta_1}} \Delta t \\ D_1 &= \left(1 - \frac{(1 - \theta_2) F_{1,2}^{\theta_1}}{V_1^{\theta_1}} \Delta t \right) n_{1,1}^k + \frac{(1 - \theta_2) F_{1,2}^{\theta_1}}{V_1^{\theta_1}} \Delta t n_{1,2}^k + \frac{F_{1,2}^{\theta_1}}{V_1^{\theta_1}} (\bar{n}_{1,1}^{\theta_1} - \bar{n}_{1,2}^{\theta_1}) \Delta t \end{aligned} \quad (2.1.182)$$

とおいて整理すれば、

$$B_1 \cdot n_{1,1}^{k+1} + C_1 \cdot n_{1,2}^{k+1} = D_1 \quad (2.1.183)$$

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、

$$\begin{aligned} V_n \frac{\partial n_{1,n}}{\partial t} &= -J_{1,R} \\ &= -F_{n-1,n} \left[(n_{1,n-1} - n_{1,n}) - (\bar{n}_{1,n-1} - \bar{n}_{1,n}) \right] \end{aligned} \quad (2.1.184)$$

である。したがって、

$$\begin{aligned} A_n &= -\frac{\theta_2 F_{n-1,n}^{\theta_1}}{V_n^{\theta_1}} \Delta t, B_n = 1 + \frac{\theta_2 F_{n-1,n}^{\theta_1}}{V_n^{\theta_1}} \Delta t \\ D_n &= \frac{(1-\theta_2) F_{n-1,n}^{\theta_1}}{V_n^{\theta_1}} \Delta t n_{1,n-1}^k + \left(1 - \frac{(1-\theta_2) F_{n-1,n}^{\theta_1}}{V_n^{\theta_1}} \Delta t \right) n_{1,n,n}^k - \frac{F_{n-1,n}^{\theta_1}}{V_n^{\theta_1}} (\bar{n}_{1,n-1}^{\theta_1} - \bar{n}_{1,n}^{\theta_1}) \Delta t \end{aligned} \quad (2.1.185)$$

とおくと、

$$A_n \cdot n_{1,n-1}^{k+1} + B_n \cdot n_{1,n}^{k+1} = D_n \quad (2.1.186)$$

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。

$$\begin{bmatrix} B_1 C_1 \\ A_2 B_2 C_2 \\ A_3 B_3 C_3 \\ \vdots \\ A_{n-2} B_{n-2} C_{n-2} \\ A_{n-1} B_{n-1} C_{n-1} \\ A_n B_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_{1,1}^{k+1} \\ n_{1,2}^{k+1} \\ n_{1,3}^{k+1} \\ \vdots \\ n_{1,n-2}^{k+1} \\ n_{1,n-1}^{k+1} \\ n_{1,n}^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ \vdots \\ D_{n-2} \\ D_{n-1} \\ D_n \end{bmatrix} \quad (2.1.187)$$

(2.1.187)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 のものを用いる⁽¹⁴⁾。すなわち、

$$D^{12} = \frac{3}{8} \left(\frac{\pi k T}{2m^*} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{n \pi d_{12}^2} \quad (2.1.188)$$

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 : ボルツマン定数

T : 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、

$$N_j = \sum_i N_{ij} \quad (i \text{ はガスの種類}) \quad (2.1.189)$$

と書ける。さらに燃料棒内全空間について

$$N = \sum_i N_j \quad (2.1.190)$$

と書ける。

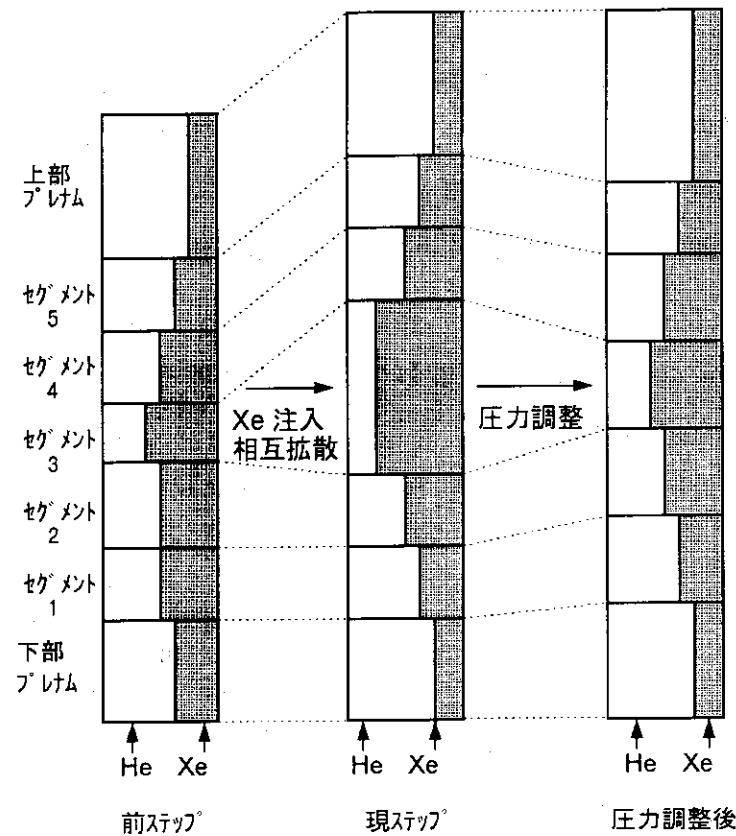


図 2.28 圧力調整の計算 (縦軸・モル数)

理想気体の法則より

$$P = N \cdot R \cdot \frac{1}{\sum_j \left(\frac{V}{T} \right)_j} \quad (2.1.191)$$

が成り立つことから、圧力調整計算後のセグメント j における全モル数を N'_j とすると

$$N'_j = \frac{P}{R} \left(\frac{V}{T} \right)_j \quad (2.1.192)$$

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上下隣接セグメント間の収支をはかって調整していく（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

$$N'_{ij} = f_{ij} \left\{ N_j - \sum_k N_{j \rightarrow k} \right\} + \sum_l f_{il} N_{l \rightarrow j} \quad (2.1.193)$$

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 つの部分に分けて扱う。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。

FEMAXI-IV 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している。

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、

$$V_h^j = \pi r_{pi}^2 l_z^j \quad (2.1.194)$$

で与えられる。スタック内の開気ガス体積には、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が含まれる。

1 ペレット長を l_p 、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} 、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、

$$V_p = \pi r_{po}^2 \Delta l / 2 \quad (2.1.195)$$

$$V_{crack} = 2\pi r_{po} u^{rel} l_p \quad (2.1.196)$$

r_{po} : ペレット外半径

Δl : 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。

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、

$$V_{int}^j = \left(V_{dish} + V_{cham} + \pi r_{po}^2 \Delta l / 2 + 2\pi r_{po} u^{rel} \cdot l_p \right) \frac{l_2^j}{l_p} \quad (2.1.197)$$

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 ε_{th}^j 、やきしまりひずみを ε_{den}^j 、固体スウェーリングひずみ ε_{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、

$$\tilde{l}_{Z,p}^j = \left(1 + \varepsilon_{th}^j + \varepsilon_{den}^j + \varepsilon_{ss}^j \right) l_Z^j \quad (2.1.198)$$

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、

$$\tilde{l}_{Z,C}^j = \left(1 + \varepsilon_{c,th}^j + \varepsilon_{c,irr}^j \right) l_Z^j \quad (2.1.199)$$

である。

同様にプレナム長 $l_{Z,pl}$ に対しても、

$$l_{Z,pl} = \left(1 + \varepsilon_{c,th}^{pl} + \varepsilon_{c,irr}^{pl} \right) l_{Z,pl} \quad (2.1.200)$$

とすると、プレナムの体積変化 ΔV_{pl} は、

$$\Delta V_{pl} = \pi r_{ci}^2 \left(\sum_{j=1}^{NAXI} \left(\tilde{l}_{Z,C}^j - \tilde{l}_{Z,p}^j \right) + \tilde{l}_{Z,pl} - l_{Z,pl} \right) \quad (2.1.201)$$

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、

$$\tilde{V}_{pl} = V_{pl} + \Delta V_{pl} \quad (2.1.202)$$

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、(2.1.63)式で求めた燃料と被覆管のギャップ幅 δ を用いて、（ただし、 $\delta < 0$ のときは $\delta = 0$ とする。）

$$\tilde{V}_{gap,j} = 2\pi r_{ci} \cdot \delta \cdot \tilde{l}_{z,p}^j \quad (2.1.203)$$

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。

$$P_{gas} = \frac{n_T \cdot R}{\frac{V_{pl}}{T_{pl}} + \sum_{j=1}^M \left(\frac{V_{gap}^j}{T_{gap}^j} + \frac{V_h^j}{T_{pi}^j} + \frac{V_{int}^j}{T_{av}^j} \right)} \quad (2.1.204)$$

ここで、

P_{gas} : 燃料棒内ガス圧 (Pa)

n_T : 全ガスマル数 (モル)

R : ガス定数、 $8.314 \text{ Joule/K} \cdot \text{mole}$

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

調整パラメータ DTPL

$T_{pl} = T_{cool}$

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、定常解による制限 Δt_1 、ガス拡散による制限 Δt_2 、非定常温度計算による制限 Δt_3 により決定される。ここで $\Delta t_1 \geq \Delta t_2 \geq \Delta t_3$ である。タイムステップ幅は、コード全体としては Δt_1 が用いられ、特に熱的ふるまい部に関しては、 Δt_3 を最小ステップ幅として用いる。ただし、FEMROD および局所解析では、その内部だけで Δt_1 の細分化が行われる。2.2.11-(3)参照。

表 2.1 タイムステップ幅の決定因子

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

① Δt_1 は定常状態のタイムステップ幅であり、解が安定するために、出力変化が 10W/cm、燃焼度変化が 100~500MWd/t に収まるようにサブルーチン PHIST で決定される。さらに、全要素の変形計算においてクリープ計算での発散を防ぐ制約として Δt_1 を決定している。また、 Δt_1 が増大する場合、前ステップで用いた Δt_1 の 1.5 倍以下になるように制限される。

② Δt_2 はガスの拡散のタイムステップ幅で、100ms または Δt_1 を上限として、各軸方向セグメントでの平衡に達するまでの時間と、セグメント間の最大移動量および圧力調整条件で決定する時間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、(2.1.155)式により、

$$\Delta t_j^i = \frac{(n_{i,j} - \bar{n}_{i,j})V_j}{J_{i,R} - J_{i,S}} \quad (2.1.205)$$

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 N_{max} を基準とすれば、 $(J_{i,R})_j = (J_{i,S})_{j-1}$ であることから、 $(J_{i,R})_j$ を用いて記述すれば、

$$\Delta t_j^2 = \frac{N_{max}}{(J_{i,R})_j} \quad (2.1.206)$$

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、

$$\Delta t_j^3 = \frac{N_{\max}}{B_j} \quad (2.1.207)$$

となる。これらの条件から Δt_2 は、

$$\Delta t_{21} = \min(\Delta t_1^1, \Delta t_2^1, \dots, \Delta t_n^1) \cdot \eta_2 \quad (2.1.208)$$

$$\Delta t_{22} = \min(\Delta t_1^2, \Delta t_2^2, \dots, \Delta t_n^2) \quad (2.1.209)$$

$$\Delta t_{23} = \min(\Delta t_1^3, \Delta t_2^3, \dots, \Delta t_n^3) \quad (2.1.210)$$

を用いて、

$$\Delta t_2 = \min(\Delta t_{21}, \Delta t_{22}, \Delta t_{23}) \quad (2.1.211)$$

で与えられる。ここで η_2 と、(2.1.206)、(2.1.207)式中の N_{\max} は、組み込みの制御パラメータである。

③ 最後に、 Δt_3 の決定方法を示す。 Δt_3 は Δt_2 をさらに細分割した、非定常温度計算部分に対する時間増分幅である。 Δt_3 は、

$$\Delta t_3 = \left\{ \frac{(\Delta r)^2}{K_i} \right\}_{\min} \cdot \eta_3 \quad (2.1.212)$$

とする。ここで、 Δr は径方向メッシュ幅、 K_i は温度伝達率である。

制御パラメータ η_3 は 10000 に設定されている。このことから、 Δt_3 の決定は、 Δt_1 中の線出力の変化率の制限によって等価的に代替されているといえる。出力変化率が 10W/cm-sec 以上になった場合は非定常として扱い、出力保持後は、タイムステップ幅を 2 倍ずつ拡大しながら、100 秒を経過した時点で自動的に定常計算に切り替える。

調整パラメータ AMLMX2, AMLMX3, DTPR, FAC

(2.1.206)式 N_{\max} は AMLMX2 により指定し、標準値 10^6 (mole)。(2.1.207)式 N_{\max} は AMLMX3 により指定し、標準値 2×10^6 (mole)。(2.1.208)式 η_2 は DTPR により指定し、標準値は 0.01。(2.1.212)式 η_3 は FAC により指定し、標準値は 10000.0。

2.2 燃料棒全長での力学的ふるまい

(詳細な力学解析 I [FEMROD] *)

(*) 詳細な力学解析の I では、ルーチンFEMRODにおいて燃料棒全長の解析が行われる。後述の 2, 3 章に示す詳細な力学解析 II においては、別なルーチンにおいて局所的な解析が行われる。解析 I と解析 II は互いに排他的にのみ実行可能であり、入力パラメータIFEMRDによってどちらかの機能を選択するかが指定される。

IFEMRD=0: 局所解析、IFEMRD=1:全長解析である。

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。

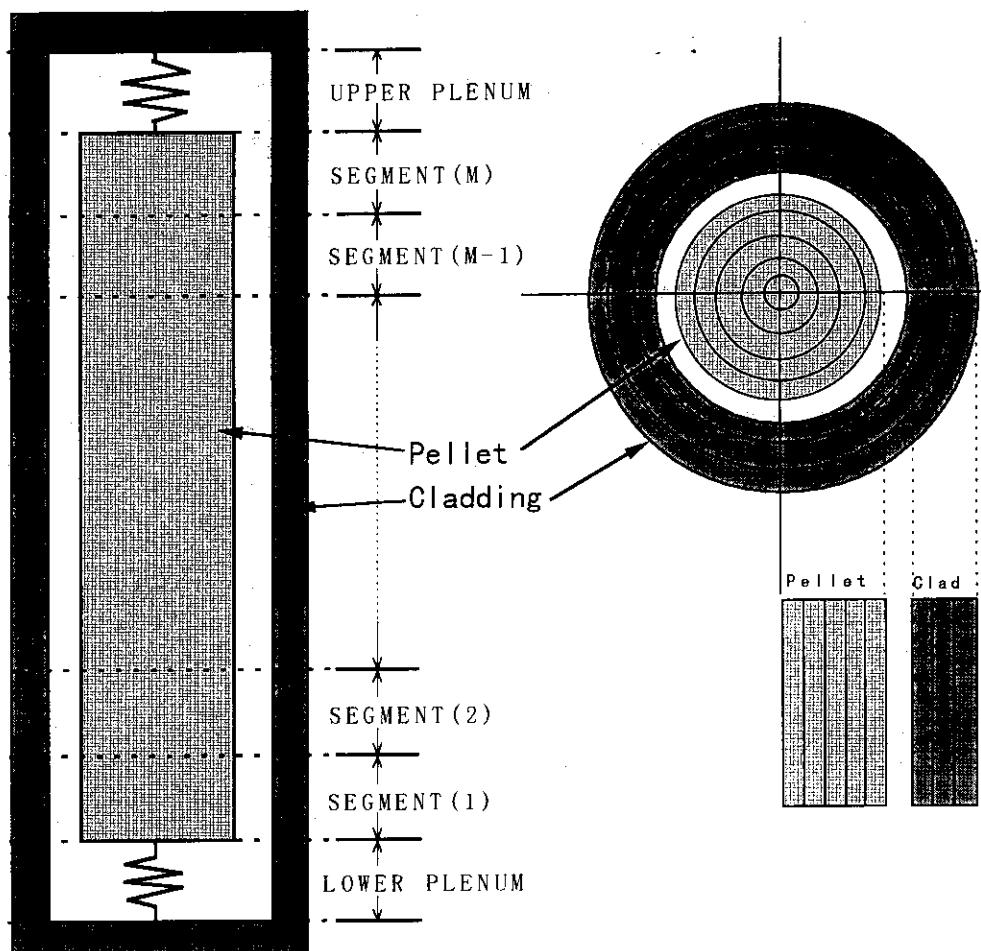


図 2.29 形状モデル

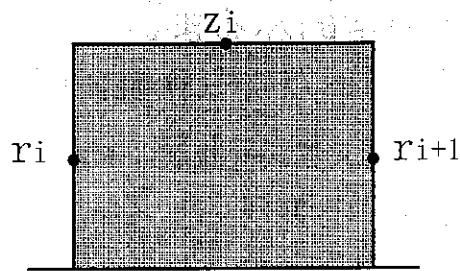


図 2.30 四角形 3 自由度モデル

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。

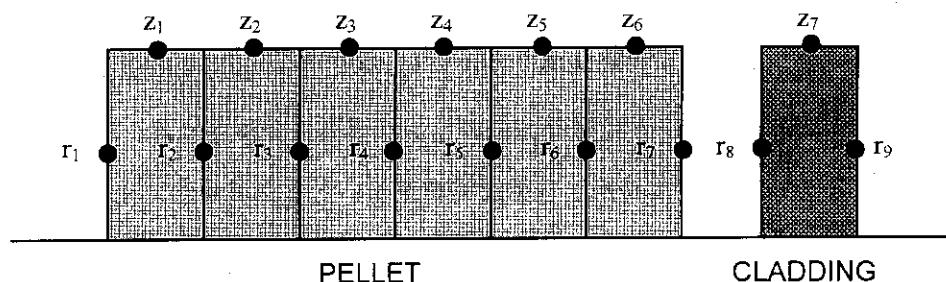


図 2.31 有限要素法メッシュ切り (1 セグメント相当)

図 2.31 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 $z_1 \sim z_6$ 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、

$$z_1 = z_2 = z_3 = z_4 = z_5 = z_6 \quad (=z_s) \quad (2.2.1)$$

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 2.30 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、軸対称座標系の場合、次のようになる。

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

(2.2.4)式で示すとおり、このモデルではひずみ成分として各主方向の成分のみを扱い、剪断成分については無視する。このため、要素の曲げ（回転）変位は扱えない。したがって、2.2 節における解析はすべて主方向成分についてのみ行われる。

(2.2.2)および(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値 $\frac{r_i + r_{i+1}}{2}$ とおくと、

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

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

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、歪み-変位マトリックス $[B]$ 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、ひずみ-応力マトリクス $[C]$ をもとめる。応力増分と弾性歪み増分との関係式は、

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

で表される。ここで、

$\{\Delta\sigma\}$: 応力増分

$\{\Delta\varepsilon^e\}$: 弹性歪み増分

である。 $[D]$ は、応力-ひずみ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、 ν はポアソン比である。

ここで、応力-歪み解析で用いられる構成方程式の基本式の解法の概略を示す。外力を $\{F\}$ 、初期ひずみ増分ベクトルを $\{\Delta\varepsilon_0\}$ とする。計算が第 n タイムステップまで進行し、次に第 $n+1$ ステップの計算を行うとき、仮想仕事の原理より、

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

の平衡方程式が与えられる。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、(2.2.14)式を

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

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

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、

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

となり、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、実際の計算においては、クリープ及び塑性に対し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、

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

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

$[C_{n+\theta}]$: ひずみ-応力マトリクス

$\{\Delta \sigma_{n+1}\}$: 応力増分ベクトル

θ : 陰解法のパラメータ

である。

また、弹性ひずみ増分は次のように表される。

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

ここで、

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

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

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

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

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

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

- $\{\Delta \varepsilon_{n+1}^{HP}\}$: ペレットホットプレスひずみ増分ベクトル
- $\{\Delta \varepsilon_{n+1}^P\}$: 塑性ひずみ増分ベクトル
- $\{\Delta \varepsilon_{n+1}^c\}$: 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。

$$\begin{aligned} \{\Delta \varepsilon_{n+1}^o\} &= \{\Delta \varepsilon_{n+1}^{th}\} - \{\Delta \varepsilon_{n+1}^{rel}\} - \{\Delta \varepsilon_{n+1}^{den}\} - \{\Delta \varepsilon_{n+1}^{sw}\} \\ \{\Delta \varepsilon_{n+1}^o\} &: \text{初期ひずみ増分ベクトル} \end{aligned} \quad (2.2.26)$$

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。

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

ここで、

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

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。

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。

2.2.3 ペレットクラック

クラックが発生したペレットのふるまいは、2.1.3 項 (3) ~ (5) において説明したので、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⁽¹⁾ に模式的に示して説明する。

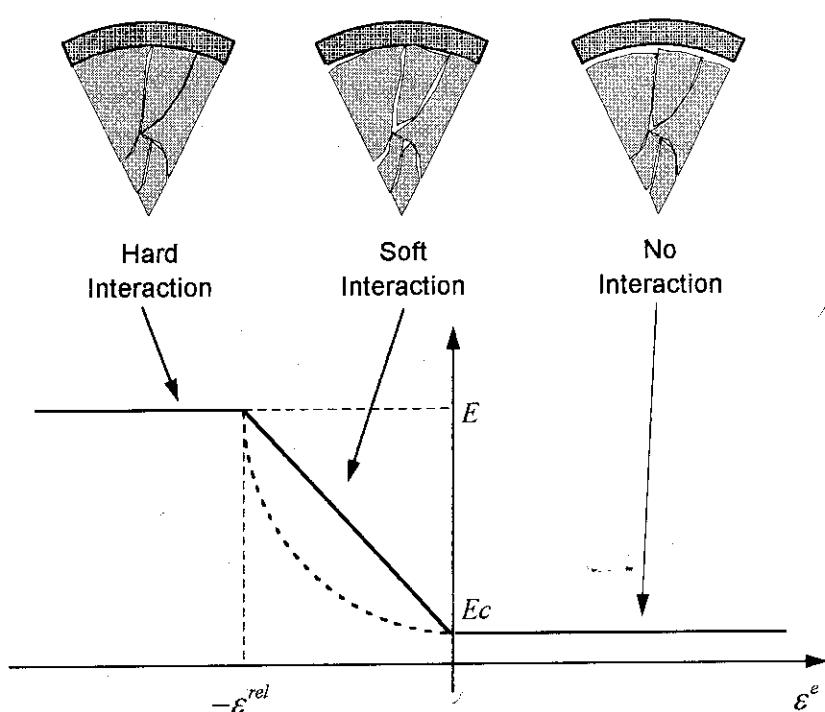


図 2.32 クラックが発生したペレットの剛性モデル

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 方向ヤング率は小さな値 (物性値の約 1/100) になると仮定する。(熱的解析モデルでは、このヤング率は 0 としての定式化を行った)

また、圧縮状態のときには、リロケーションによる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。この過程がヤング率を変化す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 $2 \times 10^9 N/m^2$ で 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 2.32 に示すペレットの剛性変化モデルにおいて、 $-e^{rel}$ から 0 の間が直線で結ばれる。

IYNG=0 の場合、 $-e^{rel}$ 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_θ : 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)

ν : 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_θ) 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、

ε_i : i 方向ひずみ

ε_i^o : i 方向初期ひずみ

ε_i^{rel} : i 方向の初期リロケーションひずみ量 (入力データ)

E_c : クラックしたペレットの引張状態での実効的なヤング率

である。

(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、

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

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。

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

より、

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

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 ε^{rel} は、径方向には hot stand-by における半径ギャップ幅を RELOC 倍した長さをペレット半径で割ったものであり、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 : 溫度(K)

ϕ : 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, ϕ 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 Δt_{n+1} として時刻 Δt_{n+1} 中の変化の計算を行っているとき、クリープひずみ増分ベクトルは、次のように書ける。

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

ここで、

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

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

(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、 θ が 1 に近づくにつれて数値解の安定性が向上する。 $(\theta \neq 0$ とする方法は陰解法と呼ばれる)。

本コードでは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 $i+1$ 回目の反復を行っているとき((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、

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

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、

$$\{\sigma'\} = \begin{cases} \frac{2\sigma_r - \sigma_z - \sigma_\theta}{3} + 2\alpha(\sigma_r + \sigma_z + \sigma_\theta) \\ \frac{2\sigma_z - \sigma_\theta - \sigma_r}{3} + 2\alpha(\sigma_r + \sigma_z + \sigma_\theta) \\ \frac{2\sigma_\theta - \sigma_r - \sigma_z}{3} + 2\alpha(\sigma_r + \sigma_z + \sigma_\theta) \end{cases}$$

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、

$$\begin{aligned} \{\dot{\varepsilon}_{n+\theta}^{c,i+1}\} &= \left\{ \beta \left(\{\sigma_{n+\theta}^i\} + \theta \{d\sigma_{n+1}^{i+1}\}, \bar{\varepsilon}_{n+\theta}^{H,i} + \theta d\bar{\varepsilon}_{n+1}^{H,i+1} \right) \right\} \\ &= \frac{3f \left(\bar{\sigma} \left(\{\sigma_{n+\theta}^i\} + \theta \{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} \right), \bar{\varepsilon}_{n+\theta}^{H,i} + \theta d\bar{\varepsilon}_{n+1}^{H,i+1} \right)}{2\bar{\sigma} \left(\{\sigma_{n+\theta}^i\} + \theta \{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} \right)} \\ &\quad \times \left\{ \sigma' \left(\{\sigma_{n+\theta}^i\} + \theta \{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} \right) \right\} \end{aligned} \quad (2.2.43)$$

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次の泰イラー展開を取ることによって次のように近似される。

$$\begin{aligned} \{\dot{\varepsilon}_{n+\theta}^{c,i+1}\} &= \frac{3}{2\bar{\sigma}_{n+\theta}^i} f_{n+\theta}^i \left\{ \sigma_{n+\theta}^{i,i} \right\} - \frac{3}{2(\bar{\sigma}_{n+\theta}^i)^2} f_{n+\theta}^i \left\{ \sigma_{n+\theta}^{i,i} \right\} \left[\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \theta \{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} \\ &\quad + \frac{3}{2\bar{\sigma}_{n+\theta}^i} f_{n+\theta}^i \left[\frac{\partial \sigma'}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \theta \{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} + \frac{3}{2\bar{\sigma}_{n+\theta}^i} \left\{ \sigma_{n+\theta}^{i,i} \right\} \left(\frac{\partial f}{\partial \bar{\sigma}} \right)_{n+\theta}^i \left[\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \theta \{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} \\ &\quad + \frac{3}{2\bar{\sigma}_{n+\theta}^i} \left\{ \sigma_{n+\theta}^{i,i} \right\} \left(\frac{\partial f}{\partial \bar{\varepsilon}^H} \right)_{n+\theta}^i \theta d\bar{\varepsilon}_{n+1}^{H,i+1} \\ &= \{\dot{\varepsilon}_{n+\theta}^{c,i}\} + \frac{3}{2\bar{\sigma}_{n+\theta}^i} \left(\left(\frac{\partial f}{\partial \bar{\sigma}} \right)_{n+\theta}^i - \frac{f_{n+\theta}^i}{\bar{\sigma}_{n+\theta}^i} \right) \left[\sigma' \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \theta \{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} \\ &\quad + \frac{3f_{n+\theta}^i}{2\bar{\sigma}_{n+\theta}^i} \left[\frac{\partial \sigma'}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \theta \{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} + \frac{3}{2\bar{\sigma}_{n+\theta}^i} \left\{ \sigma_{n+\theta}^{i,i} \right\} \left(\frac{\partial f}{\partial \bar{\varepsilon}^H} \right)_{n+\theta}^i \theta d\bar{\varepsilon}_{n+1}^{H,i+1} \end{aligned} \quad (2.2.44)$$

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、

$$\begin{aligned} \{\dot{\varepsilon}_{n+\theta}^{c,i+1}\} &= \{\dot{\varepsilon}_{n+\theta}^{c,i}\} \\ &+ \frac{9}{4(\bar{\sigma}_{n+\theta}^i)^2} \left(\left(\frac{\partial f}{\partial \bar{\sigma}} \right)_{n+\theta}^i - \frac{f_{n+\theta}^i}{\bar{\sigma}_{n+\theta}^i} \right) \left[\sigma'_i \sigma'_j \right]_{n+\theta}^i \theta \{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} \\ &+ \frac{3f_{n+\theta}^i}{2\bar{\sigma}_{n+\theta}^i} \left[\frac{\partial \sigma'}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \theta \{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} + \frac{3}{2\bar{\sigma}_{n+\theta}^i} \{\sigma''_{n+\theta}\} \left(\frac{\partial f}{\partial \bar{\varepsilon}^H} \right)_{n+\theta}^i \theta d\bar{\varepsilon}_{n+1}^{H,i+1} \end{aligned} \quad (2.2.45)$$

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。

$$\begin{aligned} \Delta \bar{\varepsilon}_{n+\theta}^{H,i+1} &= \Delta t_{n+1} f \left(\bar{\sigma}_{n+\theta}^{i+1}, \bar{\varepsilon}_{n+\theta}^{H,i+1} \right) \\ &= \Delta t_{n+1} f \left(\bar{\sigma} \left(\{\sigma'_{n+\theta}\} + \theta \{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} \right), \bar{\varepsilon}_{n+\theta}^{H,i} + \theta d\bar{\varepsilon}_{n+1}^{H,i+1} \right) \end{aligned}$$

上式は、1次のテイラー展開をとつて、次のように近似される。

$$\begin{aligned} \Delta \bar{\varepsilon}_{n+\theta}^{H,i+1} &= \Delta \bar{\varepsilon}_{n+\theta}^{H,i} + d\bar{\varepsilon}_{n+1}^{i+1} \\ &= \Delta t_{n+1} f_{n+\theta}^i + \theta \Delta t_{n+1} \left(\frac{\partial f}{\partial \bar{\sigma}} \right)_{n+\theta}^i \left| \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma} \right|_{n+\theta}^i \{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} \\ &+ \theta \Delta t_{n+1} \left(\frac{\partial f}{\partial \bar{\varepsilon}^H} \right)_{n+\theta}^i d\bar{\varepsilon}_{n+1}^{H,i+1} \end{aligned} \quad (2.2.46)$$

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。

$$d\bar{\varepsilon}_{n+1}^{H,i+1} = \frac{\theta \Delta t_{n+1} \left(\frac{\partial f}{\partial \bar{\sigma}} \right)_{n+\theta}^i \left| \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma} \right|_{n+\theta}^i \{d\sigma_{n+1}^{i+1}\}}{1 - \theta \Delta t_{n+1} \left(\frac{\partial f}{\partial \bar{\varepsilon}^H} \right)_{n+\theta}^i} \quad (2.2.47)$$

これを(2.2.45)式に代入し整理すると、

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

ここで、

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

$$F_2 = \frac{3f_{n+\theta}^i}{2\bar{\sigma}_{n+\theta}^i} \quad (2.2.50)$$

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。

$$\begin{aligned}\left\{ d\sigma_{n+1}^{i+1} \right\} &= \left[\hat{D}_{n+\theta}^i \right] \left([B] \left\{ \Delta u_{n+1}^{i+1} \right\} - \left[C_{n+\theta}^i \right] \left(\left\{ \sigma_{n+1}^i \right\} - \left\{ \sigma_n^i \right\} \right) \right. \\ &\quad \left. - \left\{ \Delta\varepsilon_{n+1}^0 \right\} - \left\{ \Delta\varepsilon_{n+1}^{C,i} \right\} - \left\{ \Delta\varepsilon_{n+1}^{P,i+1} \right\} \right)\end{aligned}\quad (2.2.52)$$

ただし、

$$\left[\hat{D}_{n+1}^i \right] = \left(\left[\tilde{C}_{n+1}^i \right] + \left[C_{n+1}^{c,i} \right] \right)^{-1}$$

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）

α : 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) ⁽¹⁵⁾

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 α を
ボロシティ 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 : ペレット内部でのボロシティ
 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 α 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。

$$\{\Delta\epsilon_{n+1}^P\} = \Delta\bar{\epsilon}_{n+1}^P \left\{ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right\}_{n+\theta} \quad (2.2.55)$$

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。

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

$$\{\Delta\epsilon_{n+1}^{P,i+1}\} = \Delta\bar{\epsilon}_{n+1}^{P,i+1} \left\{ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right\}_{n+\theta}^i \quad (2.2.57)$$

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

$$h(\{\sigma_n\} + \left[\frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \{\Delta\sigma_{n+1}^{i+1}\}) = K(\bar{\epsilon}_n^P, T_n) + \left(\frac{\partial K}{\partial \bar{\epsilon}^P} \right)_{n+\theta}^i \Delta\bar{\epsilon}_{n+1}^{P,i+1} + \left(\frac{\partial K}{\partial T} \right)_{n+\theta} \Delta T_{n+1} \quad (2.2.58)$$

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、

$$\Delta \bar{\epsilon}_{n+1}^{P,i+1} = \frac{1}{H_{n+\theta}^i} \left(\left[\frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \left(\{\sigma_{n+1}^i\} - \{\sigma_n\} \right) + h(\{\sigma_n\}) - K(\bar{\epsilon}_n^P, T_n) \right. \\ \left. - \left(\frac{\partial K}{\partial T} \right)_{n+\theta} \Delta T_{n+1} + \left[\frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} \right) \quad (2.2.60)$$

ここで、

$$H_{n+\theta}^i = \left(\frac{\partial K}{\partial \bar{\epsilon}_P} \right)_{n+\theta}^i \quad (2.2.61)$$

である。

(2.2.60)式に(2.2.52)式を代入すると、

$$H_{n+1}^i \Delta \bar{\epsilon}_{n+1}^{P,i+1} + \left(\frac{\partial K}{\partial T} \right)_{n+\theta} \Delta T_{n+1} - h(\{\sigma_n\}) + K(\bar{\epsilon}_n^P, T_n) \\ = \left[\frac{\partial \sigma}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \left(\{\sigma_{n+1}^i\} - \{\sigma_n\} \right) \\ + \left[\frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \left[\hat{D}_{n+\theta}^i \left[[B] \{\Delta u_{n+1}^{i+1}\} - [\tilde{C}_{n+\theta}^i] (\{\sigma_{n+1}^i\} - \{\sigma_n\}) \right] - \{\Delta \epsilon_{n+1}^o\} - \Delta \bar{\epsilon}_{n+1}^{P,i+1} \left[\frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \right] \quad (2.2.62)$$

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

$$\Delta \bar{\epsilon}_{n+1}^{P,i+1} = \frac{\left[\frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \left[\hat{D}_{n+\theta}^i \right] \left[[B] \{\Delta u_{n+1}^{i+1}\} - [\tilde{C}_{n+\theta}^i] (\{\sigma_{n+1}^i\} - \{\sigma_n\}) \right] - \{\Delta \epsilon_{n+1}^o\} - \{\Delta \epsilon_{n+1}^{c,i}\}}{H_{n+\theta}^i + \left[\frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \left[\hat{D}_{n+\theta}^i \right] \left[\frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i} \\ + \frac{\left[\frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \left(\{\sigma_{n+1}^i\} - \{\sigma_n\} \right) - \left(\frac{\partial K}{\partial T} \right)_{n+\theta} \Delta T_{n+1} - h(\{\sigma_n\}) + K(\bar{\epsilon}_n^P, T_n)}{H_{n+\theta}^i + \left[\frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \left[\hat{D}_{n+\theta}^i \right] \left[\frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i} \quad (2.2.63)$$

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

$$\{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} = \left[\hat{D}_{n+\theta}^i \right] \left[[B] \{\Delta u_{n+1}^{i+1}\} - [\tilde{C}_{n+\theta}^i] (\{\sigma_{n+1}^i\} - \{\sigma_n\}) \right] - \{\Delta \epsilon_{n+1}^o\} - \{\Delta \epsilon_{n+1}^{c,i}\} \\ - \frac{\left[\hat{D}_{n+\theta}^i \right] \left[\frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \left[\frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \left[\hat{D}_{n+\theta}^i \right]}{H_{n+\theta}^i + \left[\frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \left[\hat{D}_{n+\theta}^i \right] \left[\frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i}$$

$$\begin{aligned}
& \times \left([B] \{ \Delta u_{n+1}^{i+1} \} - \left[\tilde{C}_{n+\theta}^i \right] \left(\{ \sigma_{n+1}^i \} - \{ \sigma_n \} \right) - \left\{ \Delta \varepsilon_{n+1}^o \right\} - \left\{ \Delta \varepsilon_{n+1}^{c,i} \right\} \right) \\
& - \frac{\left[\hat{D}_{n+\theta}^i \right] \left\{ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right\}_{n+\theta}^i \left(\left[\frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \left(\{ \sigma_{n+1}^i \} - \{ \sigma_n \} \right) - \left(\frac{\partial K}{\partial T} \right)_{n+\theta} \Delta T_{n+1} - h(\{ \sigma_n \}) + K(\bar{\varepsilon}_n^P, T_n) \right)}{H_{n+\theta}^{i,i} + \left[\frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \left[\hat{D}_{n+\theta}^i \right] \left\{ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right\}_{n+\theta}^i} \\
& \quad (2.2.64)
\end{aligned}$$

これを整理すると次のようになる。

$$\begin{aligned}
\{ d\sigma_{n+1}^{i+1} \} &= \left[\hat{D}_{n+\theta}^{p,i} \right] \left([B] \{ \Delta u_{n+1}^{i+1} \} - \left[\tilde{C}_{n+\theta}^i \right] \left(\{ \sigma_{n+1}^i \} - \{ \sigma_n \} \right) - \left\{ \Delta \varepsilon_{n+1}^o \right\} - \left\{ \Delta \varepsilon_{n+1}^{c,i} \right\} \right) \\
& + \left\{ S_{n+\theta}^i \right\} \Delta T_{n+1} - \{ Z_1 \} - \{ Z_2 \}
\end{aligned} \quad (2.2.65)$$

ここで、

$$\left[\hat{D}_{n+\theta}^{p,i} \right] = \left[\hat{D}_{n+\theta}^i \right] - \frac{\left[\hat{D}_{n+\theta}^i \right] \left\{ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right\}_{n+\theta}^i \left[\frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \left[\hat{D}_{n+\theta}^i \right]}{H_{n+\theta}^{i,i} + \left[\frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \left[\hat{D}_{n+\theta}^i \right] \left\{ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right\}_{n+\theta}^i} \quad (2.2.66)$$

$$\left\{ S_{n+\theta}^i \right\} = \frac{\left[\hat{D}_{n+\theta}^i \right] \left\{ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right\}_{n+\theta}^i \left(\frac{\partial K}{\partial T} \right)_{n+\theta}}{H_{n+\theta}^{i,i} + \left[\frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \left[\hat{D}_{n+\theta}^i \right] \left\{ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right\}_{n+\theta}^i} \quad (2.2.67)$$

$$\left\{ Z_1 \right\} = \frac{\left[\hat{D}_{n+\theta}^i \right] \left\{ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right\}_{n+\theta}^i \left[\frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \left(\{ \sigma_{n+1}^i \} - \{ \sigma_n \} \right)}{H_{n+\theta}^{i,i} + \left[\frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \left[\hat{D}_{n+\theta}^i \right] \left\{ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right\}_{n+\theta}^i} \quad (2.2.68)$$

$$\left\{ Z_{21} \right\} = \frac{\left[\hat{D}_{n+\theta}^i \right] \left\{ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right\}_{n+\theta}^i \left[\frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \left(h(\{ \sigma_n \}) - K(\bar{\varepsilon}_n^P, T_n) \right)}{H_{n+\theta}^{i,i} + \left[\frac{\partial h}{\partial \sigma} \right]_{n+\theta}^i \left[\hat{D}_{n+\theta}^i \right] \left\{ \frac{\partial h}{\partial \sigma} \right\}_{n+\theta}^i} \quad (2.2.69)$$

である。これによって(2.2.30)式中の未知量 $\{ \Delta \varepsilon_{n+1}^{p,i+1} \}$ 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。

$$\begin{aligned} \{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} &= [\hat{D}_{n+\theta}^{P,i}] \left[[B] \{\Delta u_{n+1}^{i+1}\} - [\tilde{C}_{n+\theta}^i] (\{\sigma_{n+1}^i\} - \{\sigma_n\}) - \{\Delta \varepsilon_{n+1}^o\} - \{\Delta \varepsilon_{n+1}^{c,i}\} \right] \\ &\quad + \{S_{n+\theta}^i\} \Delta T_{n+1} - \{Z_1\} - \{Z_2\} \end{aligned} \quad (2.2.65)$$

(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。

$$[K_{n+\theta}^i] = 2\pi \int \int [B]^T [\hat{D}_{n+\theta}^{P,i}] [B] r dr dz \quad (2.2.71)$$

$$\begin{aligned} \{\Delta \hat{F}_{n+1}^i\} &= 2\pi \int \int [B]^T [\hat{D}_{n+\theta}^{P,i}] \left[[\tilde{C}_{n+\theta}^i] (\{\sigma_{n+1}^i\} - \{\sigma_n\}) \right. \\ &\quad \left. + \{\Delta \varepsilon_{n+1}^o\} + \{\Delta \varepsilon_{n+1}^{c,i}\} \right] r dr dz \\ &\quad - 2\pi \int \int [B]^T (\{S_{n+\theta}^i\} \Delta T_{n+1} - \{Z_1\} - \{Z_2\}) r dr dz \\ &\quad + \{F_{n+1}\} - 2\pi \int \int [B]^T (\sigma_{n+1}^i) r dr dz \end{aligned} \quad (2.2.72)$$

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 (ΔF_{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、

$$[C_{n+\theta}] (\{\sigma_{n+1}\} + \{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} - \{\sigma_n\}) - [B] \{\Delta u_{n+1}^{i+1}\} + \{\Delta \varepsilon_{n+1}^o\} = 0$$

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、

$$\begin{aligned} & \int_V [B]^T [D_{n+\theta}][B]\{\Delta u_{n+1}^{i+1}\} dV \\ & = \{F_{n+1}\} + \int_V [B]^T [D_{n+\theta}]\{\Delta \varepsilon_{n+1}^o\} dV + \int_V [B]^T \{\sigma_{n+1}^i\} - \{\sigma_n\} dV \\ & - \int_V [B]^T \{\sigma_{n+1}^i\} dV \end{aligned} \quad (2.2.75)$$

となり、結局、

$$\begin{aligned} \int_V [B]^T [D_{n+\theta}][B]\{\Delta u_{n+1}^{i+1}\} dV & = \{F_{n+1}\} + \int_V [B]^T [D_{n+\theta}]\{\Delta \varepsilon_{n+1}^o\} dV \\ & - \int_V [B]^T \{\sigma_n\} dV \end{aligned} \quad (2.2.76)$$

を得る。(2.2.76)式は、

$$\begin{aligned} & [K_{n+\theta}^i]\{\Delta u_{n+1}^{i+1}\} = \{\Delta \hat{F}_{n+1}^i\} \\ & [K_{n+\theta}^i] = \int_V [B]^T [D_{n+\theta}][B] dV \\ & \{\Delta \hat{F}_{n+1}^i\} = \{F_{n+1}\} - \int_V [B]^T [D_{n+\theta}]\{\Delta \varepsilon_{n+1}^o\} dV - \int_V [B]^T \{\sigma_n\} dV \end{aligned} \quad (2.2.77)$$

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。

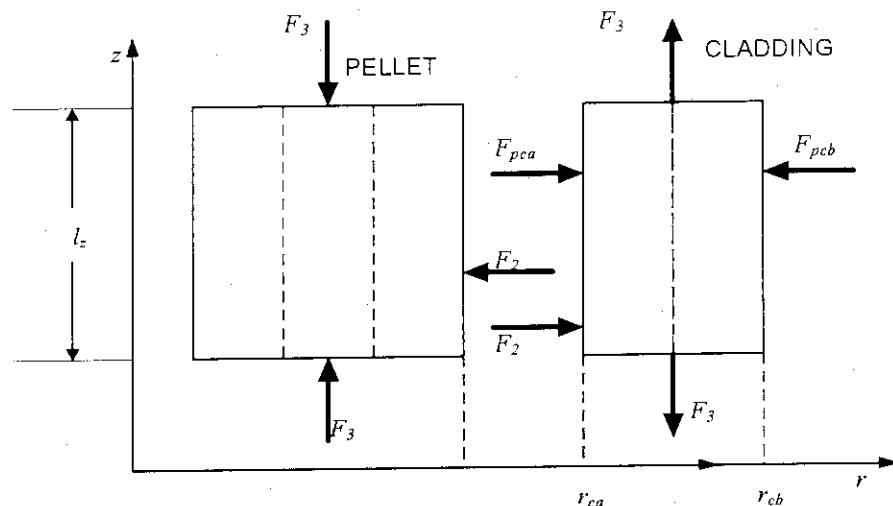


図 2.33 燃料・被覆管に作用する力

ここで、

F_2 : ペレット／被覆管接触力

F_3 : 軸力

F_{pca} : プレナムガス圧力

F_{pcb} : クーラント圧力

である。

ただし、ペレットと被覆管の間の接触力は、2.1.3 項とは独立に計算する。

ペレットの割れによって、ペレット内部にもプレナムガス圧によりガスが入り込んでいるため、
プレナムガス圧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。

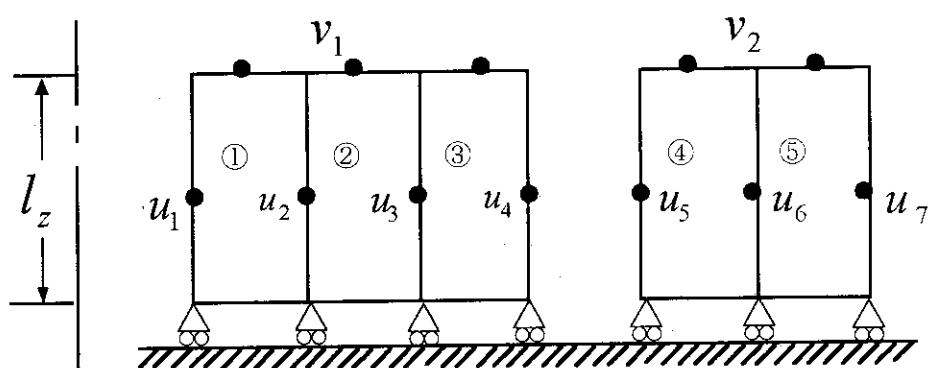


図 2.34 解析モデルの一例

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。

$$[K_{n+\theta}^i] \{ \Delta u_{n+1}^{i+1} \} = \{ \Delta \hat{F}_{n+1}^i \} \quad (2.2.70)$$

$$\begin{aligned} \{ \Delta \hat{F}_{n+1}^i \} &= 2\pi \int \int [B]^T [\hat{D}_{n+\theta}^{p,i}] \left[\left\{ \tilde{C}_{n+\theta}^i \right\} \left\{ \sigma_{n+1}^i \right\} - \left\{ \sigma_n \right\} \right] \\ &\quad + \left\{ \Delta \varepsilon_{n+1}^o \right\} + \left\{ \Delta \varepsilon_{n+1}^{e,i} \right\} r dr dz \\ &\quad - 2\pi \int \int [B]^T \left(\left\{ S_{n+\theta}^i \right\} \Delta T_{n+1} - \{ Z_1 \} - \{ Z_2 \} \right) r dr dz \\ &\quad + \{ F_{n+1} \} - 2\pi \int \int [B]^T \left(\sigma_{n+1}^i \right) r dr dz \end{aligned} \quad (2.2.72)$$

$$[K_{n+\theta}^i] \{ \Delta u_{n+1}^{i+1} \} = \{ \Delta \hat{F}_{n+1}^i \}$$

$$[K_{n+\theta}^i] = \int_V [B]^T [\hat{D}_{n+\theta}^{p,i}] [B] dV \quad (2.2.77)$$

$$\{ \Delta \hat{F}_{n+1}^i \} = \{ F_{n+1} \} - \int_V [B]^T [D_{n+\theta}] \{ \Delta \varepsilon_{n+1}^o \} dV - \int_V [B]^T \{ \sigma_n \} dV$$

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、

$$[B_{ee}] = [K_{n+\theta}]$$

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

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 2.34 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、

$$\left[\begin{array}{ccccccc} B_{11}^1 & B_{12}^1 & 0 & 0 & 0 & 0 & B_{13}^1 & 0 \\ B_{21}^1 & B_{22}^1 + B_{11}^2 & B_{12}^1 & 0 & 0 & 0 & B_{23}^1 + B_{13}^2 & 0 \\ 0 & B_{21}^2 & B_{22}^1 + B_{11}^3 & B_{12}^3 & 0 & 0 & B_{23}^2 + B_{13}^2 & 0 \\ 0 & 0 & B_{21}^3 & B_{22}^3 & 0 & 0 & B_{23}^3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & B_{11}^4 & B_{12}^4 & 0 & B_{13}^4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & B_{21}^4 & B_{22}^4 + B_{12}^5 & B_{12}^5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & B_{21}^5 & B_{22}^5 & B_{23}^5 \\ B_{31}^1 & B_{32}^1 + B_{31}^2 & B_{32}^2 + B_{31}^3 & B_{21}^3 & 0 & 0 & B_{33}^1 + B_{33}^2 + B_{33}^3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & B_{31}^4 & B_{32}^4 + B_{31}^5 & B_{32}^5 & B_{33}^4 + B_{33}^5 \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{l} \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \\ \Delta u_3 \\ \Delta u_4 \\ \Delta u_5 \\ \Delta u_6 \\ \Delta u_7 \\ \Delta v_1 \\ \Delta v_2 \end{array} \right\}$$

$$= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ F_{pca} \\ 0 \\ -F_{pcb} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_{et,1}^1 \\ B_{et,2}^1 + B_{et,1}^2 \\ B_{et,2}^2 + B_{et,1}^3 \\ B_{et,2}^3 \\ B_{et,1}^4 \\ B_{et,2}^4 + B_{et,1}^5 \\ B_{et,2}^5 \\ B_{et,3}^1 + B_{et,3}^2 + B_{et,3}^3 \\ B_{et,3}^4 + B_{et,3}^5 \end{pmatrix} \quad (2.2.82)$$

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 Δu_4 と被覆管最内層セグメントの変位 Δu_5 を変位ベクトルマトリックスの同じ場所に入れる。したがって(2.2.77)式は次のように与える。

$$\left[\begin{array}{c|cccccc|c} & 0 & \vdots & & & & & \\ \cdots & \vdots & \vdots & & & & & \\ B_{8 \times 8} & 0 & \Delta u_4 = \Delta u_5 & \vdots & & & & \\ & 1 & \Delta v_1 & & & & & \\ & -1 & \Delta v_2 & & & & & \\ \hline 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 & 1 & -1 & 0 \end{array} \right] = \left\{ \begin{array}{c} F_{n+1} \\ \vdots \\ 0 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} B_{et} \\ \vdots \\ 0 \end{array} \right\} \quad (2.2.83)$$

(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。

$$\left[\begin{array}{c|cc|ccccc|cc} B_{33}^{1+2+3} & 0 & -B_{31}^1 & -B_{32}^1 & -B_{32}^2 - B_{31}^3 & -B_{32}^3 & 0 & 0 & -B_{33}^{1+2+3} & 0 \\ 0 & B_{33}^{4+5} & 0 & 0 & 0 & -B_{31}^4 & -B_{32}^4 & -B_{31}^5 & 0 & -B_{33}^{4+5} \\ \hline -B_{31}^1 & 0 & & & & & & & B_{31}^1 & 0 \\ -B_{32}^1 - B_{31}^2 & 0 & & & & & & & B_{32}^1 + B_{31}^2 & 0 \\ -B_{32}^2 - B_{31}^3 & 0 & & & & & & & B_{32}^2 + B_{31}^3 & 0 \\ -B_{32}^3 & -B_{31}^4 & & & & & & & -B_{32}^3 & B_{31}^4 \\ 0 & -B_{31}^4 - B_{31}^5 & & & & & & & 0 & B_{32}^4 + B_{31}^3 \\ 0 & -B_{32}^5 & & & & & & & 0 & B_{32}^3 \\ \hline -B_{33}^{1+2+3} & 0 & B_{31}^1 & B_{32}^1 + B_{31}^2 & B_{32}^2 + B_{31}^3 & B_{32}^3 & 0 & 0 & B_{33}^{1+2+3} & 0 \\ 0 & -B_{33}^{4+5} & 0 & 0 & 0 & B_{31}^4 & B_{32}^4 + B_{31}^5 & B_{32}^5 & 0 & B_{33}^{4+5} \end{array} \right] \times$$

$$\begin{Bmatrix} \Delta u_{1,l}^L \\ \Delta u_{2,l}^L \\ \Delta u_{1,l} \\ \Delta u_{2,l} \\ \Delta u_{3,l} \\ \Delta u_{4,l} = \Delta u_{5,l} \\ \Delta u_{6,l} \\ \Delta u_{7,l} \\ \Delta u_{1,l}^U \\ \Delta u_{2,l}^U \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{3,l} \\ -F_{3,l} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -F_{2,l} + F_{2,l} + F_{pca} \\ 0 \\ -F_{pca} \\ -F_{3,l} \\ F_{3,l} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} B_{et,l} \end{Bmatrix} \quad (2.2.84)$$

ここで、(2.2.84)式の l はセグメント番号である。ただし、 $B_{33}^{1+2+3} = B_{33}^1 + B_{33}^2 + B_{33}^3$ の略である。

なお、マトリクスは対称である。

(2) すべりの場合

(2.2.83)式に対応して次式で与える。

$$\begin{Bmatrix} B_{9 \times 9} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ \mu \\ -\mu \\ 0 \cdots 0 \ 1 \ -1 \ 0 \ \cdots 0 \ 0 \ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \vdots \\ \vdots \\ \Delta u_4 \\ \Delta u_5 \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta v_1 \\ \Delta v_2 \\ F_2 \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} F_{n+1} \\ B_{et} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.2.85)$$

μ : 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 μ 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、 μ 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 : ペッレト外半径
 l_z : セグメント軸方向長さ
 μ^* : 摩擦係数 (測定値)

調整パラメータ AMU
摩擦係数 μ^* は AMU で指定する。 AMU の標準値は 0.4 である。

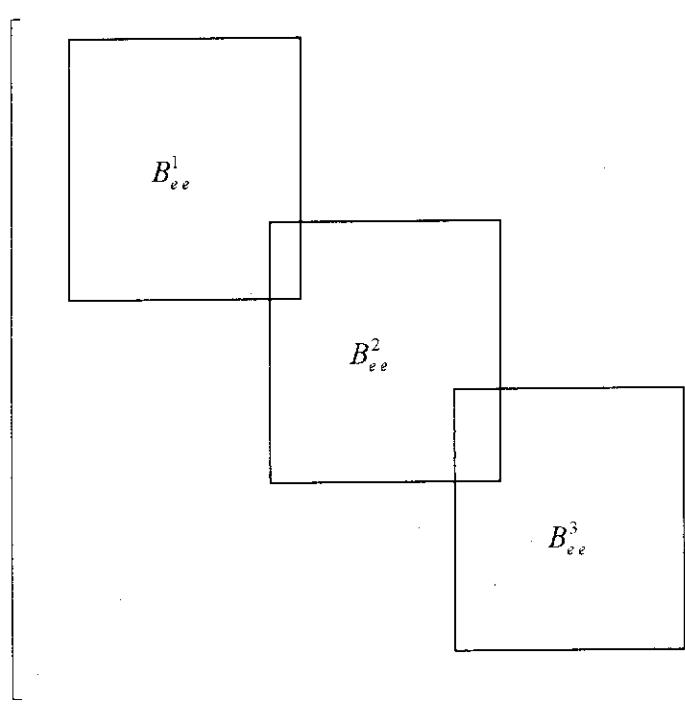
である。

(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

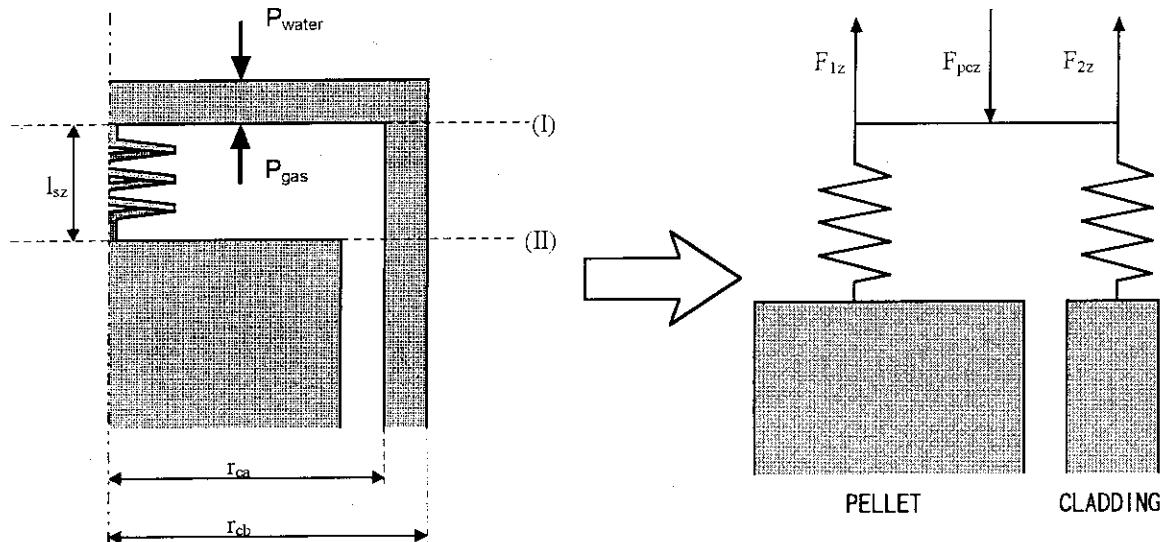


図 2.35 上部プレナム境界条件

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 r_{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
 α_s : プレナムスプリングの熱膨張係数
 α_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 1500N/m, XKSL の標準値は 2500N/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。

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} -\Delta F_{1z} \\ \Delta F_{1z} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -k_s \alpha_s l_{sz}^U (T_{n+1} - T_n) \\ k_s \alpha_s l_{sz}^U (T_{n+1} - T_n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s - k_s \\ -k_s \quad k_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v_{sz} \\ \Delta v_{1,3}^U \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} -\Delta F_{2z} \\ \Delta F_{2z} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -k_c \alpha_c l_{sz}^U (T_{n+1} - T_n) \\ k_c \alpha_c l_{sz}^U (T_{n+1} - T_n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_c - k_c \\ -k_c \quad k_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v_{sz} \\ \Delta v_{2,3}^U \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (2.2.94)$$

(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 ΔF_{1z} , ΔF_{2z} は全体マトリクスを解けば以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。

$$\begin{bmatrix}
 B_{ee} & \begin{matrix} 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 \end{matrix} & \begin{matrix} \vdots \\ \Delta u \\ \vdots \\ \Delta v_{1,3}^U \\ \Delta v_{2,3}^U \\ \vdots \\ \Delta v_{sz} \end{matrix} \\
 \begin{matrix} 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ \vdots & & & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 \end{matrix} & \begin{matrix} B_{ee} + k_s & B_{ee} & -k_s \\ B_{ee} & B_{ee} + k_c & -k_c \\ -k_s & -k_c & k_s + k_c \end{matrix} & \begin{matrix} \vdots \\ \Delta F \\ \vdots \\ \Delta F_{1z} - k_s \alpha_s l_{sz}^U (T_{n+1} - T_n) \\ \Delta F_{2z} - k_c \alpha_c l_{sz}^U (T_{n+1} - T_n) \\ \Delta F_{pcz} + (k_s \alpha_s + k_c \alpha_c) l_{sz}^U (T_{n+1} - T_n) \end{matrix} \\
 \end{bmatrix} = \begin{matrix} \vdots \\ \Delta F \\ \vdots \\ \Delta F_{1z} - k_s \alpha_s l_{sz}^U (T_{n+1} - T_n) \\ \Delta F_{2z} - k_c \alpha_c l_{sz}^U (T_{n+1} - T_n) \\ \Delta F_{pcz} + (k_s \alpha_s + k_c \alpha_c) l_{sz}^U (T_{n+1} - T_n) \end{matrix} \\
 + \begin{Bmatrix} B_{et,n+1} \end{Bmatrix} \quad (2.2.96)$$

(2) 下部プレナム

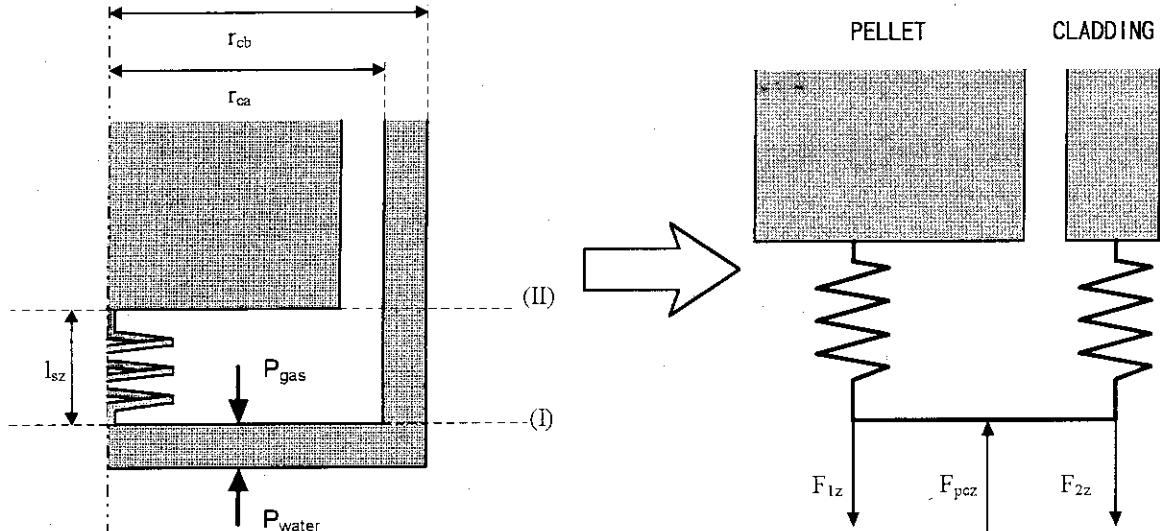


図 2.36 下部プレナム境界条件

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、

$$\begin{cases}
 F_{1z} = -k_s v_{1,1}^L + k_s \alpha_s l_{sz}^L (T_{n+1} - T_0) \\
 F_{2z} = -k_c v_{2,1}^L + k_c \alpha_c l_{sz}^L (T_{n+1} - T_0)
 \end{cases} \quad (2.2.97)$$

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、

$$\left[\begin{array}{cc|ccc|ccc} B_{ee} + k_s & B_{ce} & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ B_{ce} & B_{ee} + k_c & 0 & \cdots & 0 & \vdots & & \vdots \\ \hline 0 & 0 & & & & \vdots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & B_{ee} & & \vdots & & \vdots & \\ \vdots & \vdots & & & 0 & \cdots & 0 & \\ \hline \vdots & \vdots & 0 & \cdots & 0 & B_{ee} + k_s & B_{ce} & -k_s \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & B_{ce} & B_{ee} + k_c & -k_c \\ \hline 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -k_s & -k_c & k_s + k_c \end{array} \right] \begin{bmatrix} \Delta v_{1,1}^L \\ \Delta v_{2,1}^L \\ \vdots \\ \Delta u \\ \vdots \\ \Delta v_{1,3}^U \\ \Delta v_{2,3}^U \\ \Delta v_{\infty} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Delta F_{1z} + k_s \alpha_s l_{sz}^L (T_{n+1} - T_n) \\ -\Delta F_{2z} + k_c \alpha_c l_{sz}^L (T_{n+1} - T_n) \\ \vdots \\ \Delta F \\ \vdots \\ \Delta F_{1z} - k_s \alpha_s l_{sz}^L (T_{n+1} - T_n) \\ \Delta F_{2z} - k_c \alpha_c l_{sz}^L (T_{n+1} - T_n) \\ \Delta F_{pcz} + (k_s \alpha_s + k_c \alpha_c) l_{sz}^L (T_{n+1} - T_n) \end{bmatrix} \quad (2.2.99)$$

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2.2に示す。

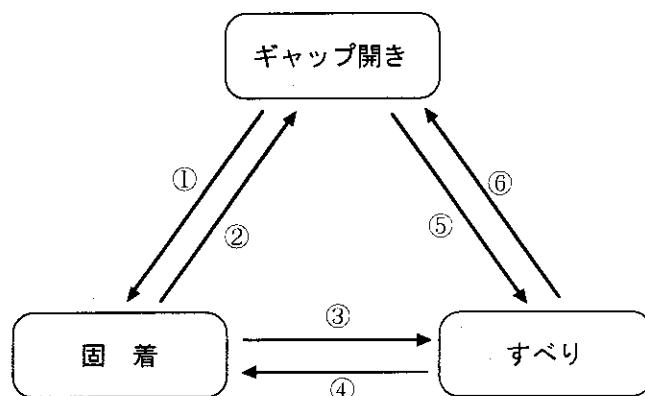


図 2.37 接触状態の変化 (①～⑥は表 2.2 参照)

表 2.2 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	ギャップ開き → 固着	ギャップ幅が正から負に変化した時に、 タイムステッ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 固着と判定
②	固着 → ギャップ開き	接触力 F_2 が負から正に変化した場合、ギャップ開きと判定。 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 $ F_3 \geq \mu F_2 $ に変化した時、すべりと判定。 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 $ F_3 < \mu F_2 $ に変化した時、固着と判定。 タイムステップコントロールは行わない。
⑤	すべり → ギャップ開き	②の条件と同じ。
⑥	ギャップ開き → すべり	ギャップ幅が正から負に変化したとき、 タイムステップコントロールを行い、 $ F_3 \geq \mu F_2 $ の条件を満足した場合 すべりと判定。

ここで F_2 はペレット・被覆管径方向接触力、 F_3 はペレット・被覆管軸方向接触力、また μ 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、 Δv_p はペレットの軸方向変位増分で、 Δv_c は被覆管の変位増分である。また、 μ 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、

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

または

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

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、

$$\begin{aligned} S_{i,i+1} &= F_{3,U} + (F_{3,5} - F_{3,U}) + (F_{3,4} - F_{3,5}) \\ &\quad + \cdots + (F_{3,i} - F_{3,i+1}) \\ &= F_{3,i} \end{aligned} \quad (2.2.97)$$

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。

(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、

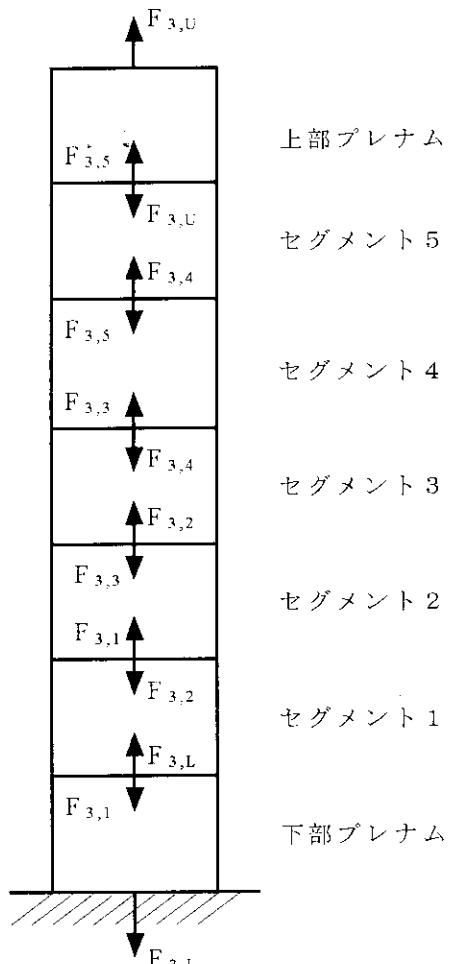


図 2.38 ペレットにかかる軸方向の力

接触状態（非接触 \rightarrow 接触）の変更があった場合、タイムステップコントロールを行い、以下に示す時点において状態を変更する。

非接触 → 接触への変化：ギャップ幅がゼロとなる時点

接触 → 非接触への変化：接触圧がゼロとなる時点

これらの場合は、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 Δt_1 （表 2.1 で定義）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触条件で行う。

すなわち、熱的解析部分は 2.1.6 節で述べた方法で Δt_1 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 Δt_1 が細分化される。（これは、局所解析にも適用される。）

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 局所での力学的ふるまい [詳細な力学解析Ⅱ]

局所力学解析では、軸対称 FEM を燃料棒の半ペレット長相当部に適用して解析する。この部分を着目セグメントと呼ぶ。FEM モデルの例を図 2.39 に示す。本モデルでは、要素として四角形 8 節点アイソパラメトリック要素を用い、要素内の変位は節点変位の 2 次関数で近似する。

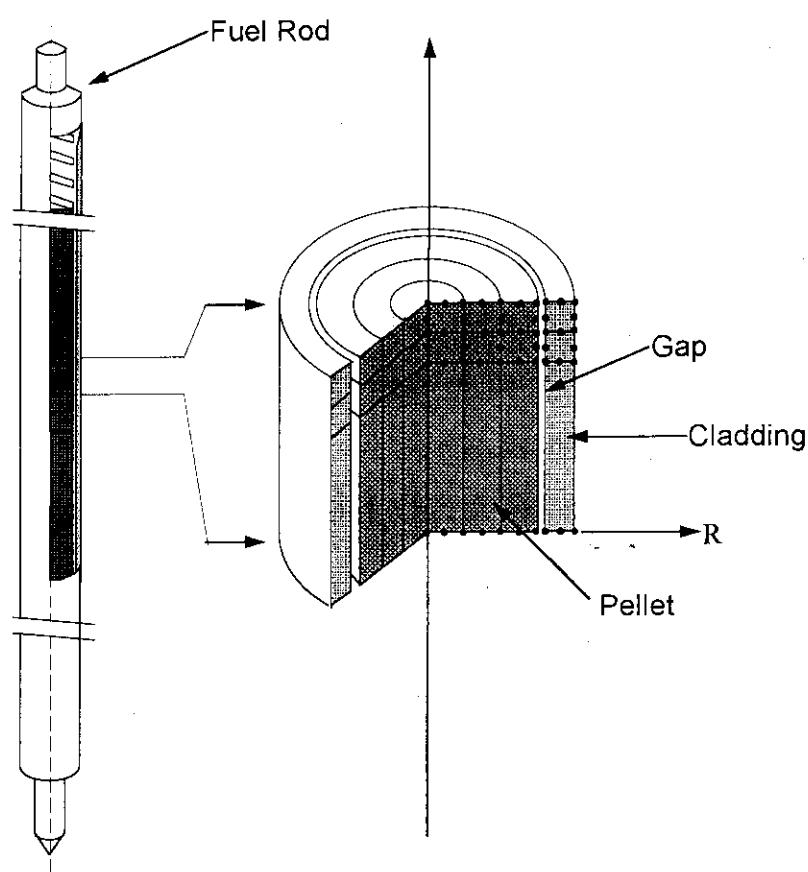


図 2.39 局所力学的解析モデル

なお、本節で用いる要素内での歪み成分を以下のように定義する。

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_\theta \\ \gamma_{rz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{du}{dr} \\ \frac{dv}{dz} \\ \frac{u}{r} \\ \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right) + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{Bmatrix} \quad (2.3.1)$$

ここで、 ε_r 、 ε_z 、 ε_θ および γ_{rz} は、それぞれ径方向、軸方向、周方向、および剪断 ($r z$) 方向ひずみである。前節では剪断方向の成分については考慮していないが、本節ではペレットの曲

げ変形による被覆管のリッジ部での応力評価を行うことが目的のひとつであるために、剪断項を含めて解析する。

2.3.1 基本式

時刻 t_{n+1} における平衡条件は、仮想仕事の原理から次のように書くことができる。

$$\int [B]^T \{\sigma_{n+1}\} dV - \{F_{n+1}\} = 0 \quad (2.3.1)$$

ここで、

$[B]^T$: ひずみ-変位マトリクス $[B]$ の転置マトリクス

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

$\{F_{n+1}\}$: 時刻 t_{n+1} における節点荷重ベクトル

である。ひずみ-変位マトリクス $[B]$ は変形前の寸法で定められると仮定する。なお、 $[B]$ マトリックスについては、後述の(2.3.19)式で与えられる。

構成方程式（応力-ひずみ関係式）は次式で表される。

$$\{\Delta\sigma_{n+1}\} = [D_{n+\theta}] \{\Delta\varepsilon_{n+1}^e\} \quad (2.3.2)$$

ここで、

$\{\Delta\sigma_{n+1}\}$: 時刻 t_n から t_{n+1} までの応力増分ベクトル

$\{\Delta\varepsilon_{n+1}^e\}$: 時刻 t_n から t_{n+1} までの弾性ひずみ増分ベクトル

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

$[D_n]$: 時刻 t_n における応力-ひずみ（剛性）マトリクス

である。この D マトリックスの逆行列として $[C]$ マトリックスを定義すれば、(2.3.2)式は次式となる。

$$\{\Delta\varepsilon_{n+1}^e\} = [C_{n+\theta}] \{\Delta\sigma_{n+1}\} \quad (2.3.3)$$

(2.3.3)式中の $[C]$ マトリックスは、以下のように与えられる。

$$[C] = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \quad (2.3.4)$$

ここで、 E はヤング率、 ν はポアソン比である。

弾性ひずみ増分ベクトルは次のように表す。

$$\{\Delta\epsilon_{n+1}^e\} = \{\Delta\epsilon_{n+1}\} - \{\Delta\epsilon_{n+1}^0\} - \{\Delta\epsilon_{n+1}^{crk}\} - \{\Delta\epsilon_{n+1}^c\} - \{\Delta\epsilon_{n+1}^p\} \quad (2.3.5)$$

ここで、

- $\{\Delta\epsilon_{n+1}\}$: 全ひずみ増分ベクトル
- $\{\Delta\epsilon_{n+1}^0\}$: 初期ひずみ増分ベクトル
- $\{\Delta\epsilon_{n+1}^{crk}\}$: ペレットクラック歪み増分
- $\{\Delta\epsilon_{n+1}^c\}$: クリープ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

である。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ひずみは一括して初期ひずみとして取り扱われる。

ひずみ-変位関係式は次式で与えられる。

$$\{\Delta\epsilon_{n+1}\} = [B](\{u_{n+1}\} - \{u_n\}) \quad (2.3.6)$$

ここで、

$\{u_n\}$: 時刻 t_{n+1} における節点変位ベクトル

である。

(2.3.2)～(2.3.6)式から次式が得られる。

$$[C_{n+\theta}](\{\sigma_{n+1}\} - \{\sigma_n\}) - [B](\{u_{n+1}\} - \{u_n\}) + \{\Delta\epsilon_{n+1}^0\} + \{\Delta\epsilon_{n+1}^{crk}\} + \{\Delta\epsilon_{n+1}^p\} + \{\Delta\epsilon_{n+1}^c\} = 0 \quad (2.3.7)$$

ここで、

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

$$[C_n] = [D_n]^{-1}$$

である。

(2.3.1)および(2.3.7)式が未知量 $\{\sigma_{n+1}\}$ および $\{u_{n+1}\}$ を求めるための基本式である。

(2.3.7)式は、 $\{\Delta\epsilon_{n+1}^{crk}\}$ 、 $\{\Delta\epsilon_{n+1}^c\}$ および $\{\Delta\epsilon_{n+1}^p\}$ が未知量 $\{\sigma_{n+1}\}$ などの関数であるため Newton-Raphson 法による反復手順を用いて解く(2.2.4 項、2.2.5 項に詳述)。ペレットクラック、クリープおよび塑性の扱いは 2.2 節の全長の力学解析と同様である。

第 $n+1$ ステージ(時刻)の計算において、第 i 回目の反復を終了し、第 $i+1$ 回目の反復を行っているとき、(2.3.7)式は次のように書ける。

$$[C_{n+\theta}]\left(\{\sigma_{n+1}^i\} + \{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} - \{\sigma_n\}\right) - [B]\left(\Delta u_{n+1}^{i+1}\right) + \{\Delta \varepsilon_{n+1}^0\} + \{\Delta \varepsilon_{n+1}^{crk}\} + \{\Delta \varepsilon_{n+1}^c\} + \{\Delta \varepsilon_{n+1}^p\} = 0 \quad (2.3.8)$$

ここで

$$\{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} = \{\sigma_{n+1}^{i+1}\} - \{\sigma_{n+1}^i\} \quad (2.3.9)$$

$$\{\Delta u_{n+1}^{i+1}\} = \{u_{n+1}^{i+1}\} - \{u_n\} \quad (2.3.10)$$

である。

また、このとき(2.3.1)式の平衡条件は(2.3.9)式を(2.3.1)式に代入して次のようになる。

$$\int [B]^T \{\sigma_{n+1}^i\} dV + \int [B]^T \{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} dV = \{F_{n+1}\} \quad (2.3.11)$$

2.3.2 剛性方程式

剛性方程式の定式化方法は、局所力学解析においても全長力学解析においても同様であるので、全長力学解析で得られた(2.2.60)式を平衡条件式(2.3.7)式に代入し、第 $i+1$ 回目の反復時における平衡条件を得る。

[注] (2.3.11)式に代入する(2.2.65)式中における(2.2.66)~(2.2.69)式の導出にあたっては、剪断成分を考慮しているので、(2.2.54)式で示した降伏関数 h (=相当応力 $\bar{\sigma}$) は次のように修正されて本来の形で与えられる。

$$h = \bar{\sigma} = \left[\frac{3}{2(F+G+H)} \left\{ H(\sigma_r - \sigma_z)^2 + F(\sigma_z - \sigma_\theta)^2 + G(\sigma_\theta - \sigma_r)^2 + 2N\tau_n^2 \right\} + 3\alpha(\sigma_r + \sigma_z + \sigma_\theta)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

すなわち、

$$\begin{aligned} & \int [B]^T \{\sigma_{n+1}^i\} dV + \int [B]^T [\hat{D}_{n+\theta}^{P,i}] [B] \{\Delta u_{n+1}^{i+1}\} dV \\ & - \int [B]^T [\hat{D}_{n+\theta}^{P,i}] [\tilde{C}_{n+\theta}^i] (\{\sigma_{n+1}^i\} - \{\sigma_n\}) dV \\ & - \int [B]^T [\hat{D}_{n+\theta}^{P,i}] (\{\Delta \varepsilon_{n+1}^0\} + \{\Delta \varepsilon_{n+1}^{c,i}\}) dV \\ & + \int [B]^T (\{S_{n+\theta}^i\} \Delta T_{n+1} - \{Z_1\} - \{Z_2\}) dV = \{F_{n+1}\} \end{aligned} \quad (2.3.12)$$

ここで

$$[\tilde{C}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_r} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{1}{E} & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E_z} & -\frac{\nu}{E} & 0 \\ -\frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E_\theta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{4(1+\nu)}{E_r + E_z} \end{bmatrix} \quad (2.3.13)$$

である。

(2.3.13)式を整理して次のように書く。

$$[K_{n+\theta}^i] \{ \Delta u_{n+1}^{i+1} \} = \{ \Delta \hat{F}_{n+1}^i \} \quad (2.3.14)$$

この式が要素の剛性方程式である。

ここで、

$$[K_{n+\theta}^i] = \int [B]^T [\hat{D}_{n+\theta}^{P,i}] [B] dV \quad (2.3.15)$$

$$\begin{aligned} \{ \Delta \hat{F}_{n+1}^i \} &= \{ F_{n+1} \} - \int [B]^T \{ \sigma_{n+1}^i \} dV \\ &\quad - \int [B]^T [\hat{D}_{n+\theta}^{P,i}] [\tilde{C}_{n+\theta}^i] (\{ \sigma_{n+1}^i \} - \{ \sigma_n \}) + \{ \Delta \varepsilon_{n+1}^0 \} + \{ \Delta \varepsilon_{n+1}^{c,i} \} dV \\ &\quad - \int [B]^T (\{ S_{n+\theta}^i \} \Delta T_{n+1} - \{ Z_1 \} - \{ Z_2 \}) dV \end{aligned} \quad (2.3.16)$$

であり、それぞれ剛性マトリクス、荷重ベクトルである。

変形の軸対称性を仮定し、(2.3.15)式および(2.3.16)式についてそれぞれ円周方向 θ 座標の積分を実行すれば、

$$[K_{n+\theta}^i] = 2\pi \iint [B]^T [\hat{D}_{n+\theta}^{P,i}] [B] r dr dz \quad (2.3.17)$$

$$\begin{aligned} \{ \Delta \hat{F}_{n+1}^i \} &= \{ F_{n+1} \} - 2\pi \iint [B]^T \{ \sigma_{n+1}^i \} r dr dz \\ &\quad - 2\pi \iint [B]^T [\hat{D}_{n+\theta}^{P,i}] [\tilde{C}_{n+\theta}^i] (\{ \sigma_{n+1}^i \} - \{ \sigma_n \}) + \{ \Delta \varepsilon_{n+1}^0 \} + \{ \Delta \varepsilon_{n+1}^{c,i} \} r dr dz \\ &\quad - 2\pi \iint [B]^T (\{ S_{n+\theta}^i \} \Delta T_{n+1} - \{ Z_1 \} - \{ Z_2 \}) r dr dz \end{aligned} \quad (2.3.18)$$

となる。

(2.3.18)式の右辺において、第1項は非平衡残差、第2項は応力および初期ひずみなどによるみかけの荷重項であり、第3項は降伏応力変化の補正項である。

次に、1つの要素に対する剛性方程式を具体的に以下に示す。

要素内の任意の点の半径方向、軸方向の変位 $\{u, v\}$ 、および 8 個の節点における変位 $\{u^1, v^1, u^2, v^2, \dots, u^8, v^8\}$ は

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = [N] \begin{Bmatrix} u^1 \\ v^1 \\ u^2 \\ v^2 \\ \vdots \\ u^8 \\ v^8 \end{Bmatrix} \quad (2.3.19)$$

によって関係づけられる。ここで、 $[N]$ は形状関数と呼ばれ

$$[N] = [N_1 I, N_2 I, N_3 I, \dots, N_8 I] \quad (2.3.20)$$

の形を持つマトリクスである。後述の図 2.40 に示す局所座標を用いれば N_i は次のように表される。

$$\left. \begin{array}{l} N_1 = (1 - \xi)(1 - \eta)(-\xi - \eta - 1)/4 \\ N_2 = (1 + \xi)(1 - \eta)(+\xi - \eta - 1)/4 \\ N_3 = (1 + \xi)(1 - \eta)(+\xi + \eta - 1)/4 \\ N_4 = (1 - \xi)(1 + \eta)(-\xi + \eta - 1)/4 \\ N_5 = (1 + \xi)(1 - \xi)(1 - \eta)/2 \\ N_6 = (1 + \xi)(1 + \eta)(1 - \eta)/2 \\ N_7 = (1 - \xi)(1 + \eta)(1 - \eta)/2 \\ N_8 = (1 - \xi)(1 + \eta)(1 - \eta)/2 \end{array} \right\} \quad (2.3.21)$$

要素内のひずみは、軸対称問題では、次のように与えられる。（詳細な力学解析 I と異なり、剪断成分を含んでいる）

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_{rz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \partial u / \partial r \\ \partial v / \partial z \\ u/r \\ \partial u / \partial z + \partial v / \partial r \end{Bmatrix} = [B] \{u\} \quad (2.3.22)$$

したがって、 $[B]$ マトリクスは次のような。

$$[B] = [\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \mathbf{B}_3, \dots, \mathbf{B}_8] \quad (2.3.23)$$

ここではサブマトリクス \mathbf{B}_i は、

$$\mathbf{B}_i = \begin{pmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial r} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} \\ \frac{N_i}{r} & 0 \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{\partial N_i}{\partial r} \end{pmatrix} \quad (2.3.24)$$

で表される。

ところで、(2.3.21)式において、 N_i は局所座標で定義されている。そこで(2.3.22)式の $[B]$ マトリクスを具体的に書き下すために以下のように座標変換を行う。

局所座標と円柱座標 r, z の関係は次式で与えられる。

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial r}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial r}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial r} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{Bmatrix} = [\mathbf{J}] \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial r} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad (2.3.25)$$

あるいは、

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial r} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{Bmatrix} = [\mathbf{J}]^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \end{Bmatrix} \quad (2.3.26)$$

ここで、 $[\mathbf{J}]$ はヤコビアンマトリクスである。要素内の位置(r, z)を節点座標($r_i, z_i, i=1 \sim 8$)を用いて表すと、

$$\left. \begin{array}{l} r = \sum_{i=1}^8 N_i r_i \\ z = \sum_{i=1}^8 N_i z_i \end{array} \right\}$$

と表される。この関係を用いれば、ヤコビアン $[\mathbf{J}]$ は次のように書ける。

$$[\mathbf{J}] = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^8 \frac{\partial N_i}{\partial \xi} r_i & \sum_{i=1}^8 \frac{\partial N_i}{\partial \xi} z_i \\ \sum_{i=1}^8 \frac{\partial N_i}{\partial \eta} r_i & \sum_{i=1}^8 \frac{\partial N_i}{\partial \eta} z_i \end{pmatrix} \quad (2.3.27)$$

したがって $[\mathbf{J}]^{-1}$ は、

$$[\mathbf{J}]^{-1} = \frac{1}{\det[\mathbf{J}]} \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^8 \frac{\partial N_i}{\partial \eta} z_i & -\sum_{i=1}^8 \frac{\partial N_i}{\partial \xi} z_i \\ -\sum_{i=1}^8 \frac{\partial N_i}{\partial \eta} r_i & \sum_{i=1}^8 \frac{\partial N_i}{\partial \xi} r_i \end{pmatrix} \quad (2.3.28)$$

ここで、

$$\det[\mathbf{J}] = \left(\sum_{i=1}^8 \frac{\partial N_i}{\partial \xi} r_i \right) \left(\sum_{i=1}^8 \frac{\partial N_i}{\partial \eta} z_i \right) - \left(\sum_{i=1}^8 \frac{\partial N_i}{\partial \eta} r_i \right) \left(\sum_{i=1}^8 \frac{\partial N_i}{\partial \xi} z_i \right) \quad (2.3.29)$$

である。

以上の関係を用いて、(2.3.24)式に示した成分を局所座標に変換すると、

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial N_i}{\partial r} &= \frac{1}{\det[\mathbf{J}]} \left(\left(\sum_{j=1}^8 \frac{\partial N_j}{\partial \eta} z_j \right) \frac{\partial N_i}{\partial \xi} - \left(\sum_{j=1}^8 \frac{\partial N_j}{\partial \xi} z_j \right) \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \right) \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} &= \frac{1}{\det[\mathbf{J}]} \left(\left(\sum_{j=1}^8 \frac{\partial N_j}{\partial \xi} r_j \right) \frac{\partial N_i}{\partial \eta} - \left(\sum_{j=1}^8 \frac{\partial N_j}{\partial \eta} r_j \right) \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \right) \\ \frac{N_i}{r} &= \frac{N_i}{\sum_{j=1}^8 N_j r_j} \end{aligned} \right\} \quad (2.3.30)$$

を得る。

$drdz$ は次式により変換される。

$$drdz = \det[\mathbf{J}] d\xi d\eta \quad (2.3.31)$$

以上の変換式を用いれば、(2.3.17)式および(2.3.18)式は局所座標で次のように表される。

$$[K_{n+\theta}^i] = 2\pi \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [\hat{D}_{n+\theta}^{P,i}] [B] \left(\sum_{j=1}^8 N_j r_j \right) \det[\mathbf{J}] d\xi d\eta \quad (2.3.32)$$

$$\begin{aligned} \{\Delta \hat{F}_{n+1}^i\} &= \{F_{n+1}\} - 2\pi \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T \{\sigma_{n+1}^i\} d\xi d\eta \\ &\quad - 2\pi \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [\hat{D}_{n+\theta}^{P,i}] [\tilde{C}_{n+\theta}^i] (\{\sigma_{n+1}^i\} - \{\sigma_n\}) + \{\Delta \varepsilon_{n+1}^0\} + \{\Delta \varepsilon_{n+1}^{c,i}\} d\xi d\eta \quad (2.3.33) \\ &\quad - 2\pi \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T (\{S_{n+\theta}^i\} \Delta T_{n+1} - \{Z_1\} - \{Z_2\}) d\xi d\eta \end{aligned}$$

コード中では、この積分はガウスの求積法を用いて次式のように近似して計算する。

$$\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 f(\xi, \eta) d\xi d\eta = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m H_i H_j f(\xi_i, \eta_j) \quad (2.3.34)$$

である。四角形 8 節点要素では、積分点数は $n = m = 2$ とすれば十分であることが知られている。このとき $H_i = H_j = 1$ であるので、本コードには次の近似公式が適用される。

$$\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 f(\xi, \eta) d\xi d\eta = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 f(\xi_i, \eta_j) \quad (2.3.35)$$

ここで、

- n : ξ 方向積分点数
- m : η 方向積分点数
- ξ_i : ξ 方向積分点座標
- η_j : η 方向積分点座標
- H_i, H_j : 重み係数

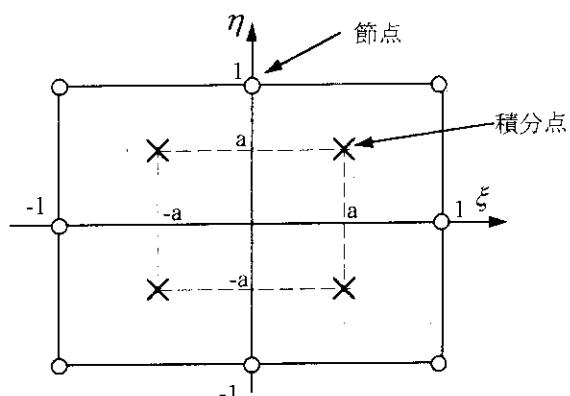


図 2.40 四角形 8 節点要素の積分点

積分点は 4 点であり、それぞれの座標は図 2.40 に示す通り、 (a, a) 、 $(a, -a)$ 、 $(-a, a)$ 、 $(-a, -a)$ であり、 $a = 0.5773502691$ である*。 (*注：ガウスの 2 点近似の積分公式 = $\int_{-1}^1 f(x) dx \approx (f(a) + f(-a))$)

4 個の積分点についてそれぞれ応力ベクトル、ひずみベクトル、補正項などを計算すれば、(2.3.32)および(2.3.33)式中の積分項が求められる。

2.3.3 境界条件

(1) 幾何学的モデル化と境界条件

力学的ふるまい解析で用いられる有限要素モデル（幾何学的モデル）は、図 2.41 に例示するように、 $1/2$ ペレット長を対象としている。このモデルはペレット側に 4 つ((1)~(4))、被覆管側に 4 つ((5)~(8))計 8 つの境界をもつ。これらの境界では、変形の対称性、冷却水圧力、ガス圧力や接触モードなどから境界条件が与えられる。

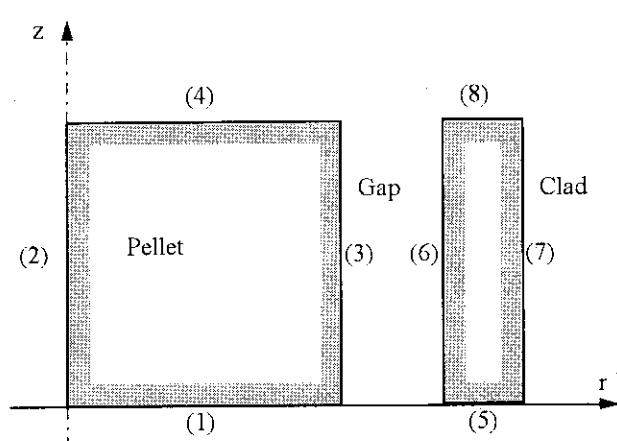


図 2.41 幾何学的モデルの境界

(2.3.1)式における荷重ベクトルはこれら 8 つの境界上にある節点に作用する荷重の総和として

次のように表される。

$$\{F_{n+1}\} = \{F_{n+1}^{(1)}\} + \{F_{n+1}^{(2)}\} + \{F_{n+1}^{(3)}\} + \{F_{n+1}^{(4)}\} + \{F_{n+1}^{(5)}\} + \{F_{n+1}^{(6)}\} + \{F_{n+1}^{(7)}\} + \{F_{n+1}^{(8)}\} \quad (2.3.36)$$

ここで $\{F_{n+1}^{(i)}\}$ は境界(i)の節点に作用する荷重ベクトルである。

境界(1)および(5)においては、変形の面対称性を仮定し、これら境界上の節点は軸方向に変位しない、すなわち、

$$\{\Delta v^{(1)}\} = 0 \quad (2.3.37)$$

$$\{\Delta v^{(5)}\} = 0 \quad (2.3.38)$$

とする。ここで、 $\{\Delta v^{(1)}\}$ 、 $\{\Delta v^{(5)}\}$ はそれぞれ境界(1)および(2)の節点の軸方向変位増分ベクトルである。(2.3.37)式の拘束条件により境界(1)に発生する拘束力が $\{F_{n+1}^{(1)}\}$ であり、(2.3.38)式の条件により境界(5)に生じる拘束力が $\{F_{n+1}^{(5)}\}$ である。

境界(2)においては、変形の軸対称性が仮定されるので中実ペレットの場合は、境界上の節点は径方向に変位しない、すなわち、

$$\{\Delta u^{(2)}\} = 0 \quad (2.3.39)$$

とする。ここで、 $\{\Delta u^{(2)}\}$ は境界(2)上の節点の径方向変位増分ベクトルである。

(2.3.39)式の条件により境界(2)（回転対称軸）に発生する拘束力が $\{F_{n+1}^{(2)}\}$ である。ただし、中空ペレットの場合には径方向変位が拘束されないので、 $\{F_{n+1}^{(2)}\} = 0$ である。

境界(7)には冷却水圧による表面力が作用する。 $\{F_{n+1}^{(7)}\}$ は、この作用による等価節点荷重ベクトルである。

境界(3)には境界(6)との相互作用 (PCI) による接触力の作用がある。また境界(3)には燃料棒内ガス圧の作用もあるが、ペレット内部の割れのすきまに存在するガス圧と打ち消し合うので、これは考えない。 $\{F_{n+1}^{(3)}\}$ は被覆管（境界(6)）との相互作用による接触力ベクトルである。

境界(6)には PCI による接触力とガス圧の作用を考える。 $\{F_{n+1}^{(6)}\}$ は接触力ベクトルとガス圧による等価節点荷重ベクトルの和として表される。

境界(8)では、上側にある被覆管との変形の対称性を仮定して、境界上にある節点群をまとめて同じ軸方向自由度として扱う。すなわち、

$$\{\Delta v^{(8)}\} = \Delta \bar{v}^{(8)} \quad (2.3.40)$$

ここで、 $\Delta \bar{v}^{(8)}$ は境界(8)上の節点の軸方向変位増分である。境界(8)には上式の条件により発生する拘束力の他に、燃料棒上方の PCI 軸方向引張荷重、ガス圧や冷却水圧による軸方向荷重の作用が考慮される。境界(8)に作用させる燃料棒上方の PCI による軸方向荷重は経験的に定められる

ものとする。この取扱いについては後述する。

境界(4)では、この経験的に定められる軸方向荷重を圧縮側に作用させる。この軸方向荷重下における面对称を仮定したペレット／ペレット接触問題を解くことにより求められる接触力分布が、境界に作用する荷重である。

以上に述べたように、8つの境界に作用する荷重の種類には、変位の拘束による反力、冷却水圧力による等価節点力、ガス圧による等価節点力、ペレット／被覆管接触力、軸方向引張荷重、およびこれに釣合うペレット／ペレット接触力がある。荷重の種類を明らかにするために、それぞれ、R、W、G、PC、AX、およびPPの添字を付して、(2.3.36)式を次のように書く。

$$\begin{aligned} \{F_{n+1}\} = & \{F_{n+1}^{(1),R}\} + \{F_{n+1}^{(2),R}\} + \{F_{n+1}^{(3),PC}\} + \{F_{n+1}^{(4),PP}\} + \{F_{n+1}^{(5),R}\} + \{F_{n+1}^{(6),PC}\} \\ & + \{F_{n+1}^{(6),G}\} + \{F_{n+1}^{(7),W}\} + \{F_{n+1}^{(8),R}\} + \{F_{n+1}^{(8),AX}\} + \{F_{n+1}^{(8),W}\} + \{F_{n+1}^{(8),G}\} \end{aligned} \quad (2.3.41)$$

これを力の扱い方により3種に分けて、

$$\{F_{n+1}\} = \{F'_{n+1}\} + \{F''_{n+1}\} + \{F'''_{n+1}\} \quad (2.3.42)$$

と書く。

ここで、

$$\{F'_{n+1}\} = \{F_{n+1}^{(6),G}\} + \{F_{n+1}^{(7),W}\} + \{F_{n+1}^{(8),W}\} + \{F_{n+1}^{(8),G}\} \quad (2.3.43)$$

$$\{F''_{n+1}\} = \{F_{n+1}^{(1),R}\} + \{F_{n+1}^{(2),R}\} + \{F_{n+1}^{(5),R}\} + \{F_{n+1}^{(8),R}\} \quad (2.3.44)$$

$$\{F'''_{n+1}\} = \{F_{n+1}^{(3),PC}\} + \{F_{n+1}^{(4),PP}\} + \{F_{n+1}^{(6),PC}\} + \{F_{n+1}^{(8),AX}\} \quad (2.3.45)$$

である。

$\{F'_{n+1}\}$ は時刻 t_{n+1} における値が既知として取扱われ、 $\{F''_{n+1}\}$ は既知の境界条件（指定変位）による拘束力である。 $\{F'''_{n+1}\}$ は未知量に依存する境界条件によって定まるものであり、これを求めるには、ペレット／被覆管およびペレット／ペレット間の相互作用を解く必要がある。

(2) ペレット／被覆管相互作用

(2.3.45)式における $\{F'''_{n+1}\}$ の求め方を以下に示す。Newton-Raphson 法の繰り返しが終了した状態では(2.3.14), (2.3.15)および(2.3.16)式から繰り返しの添字 i を省略して、次のように表す。ただし、 $\hat{\cdot}$ は繰り返し計算内部の暫定値であることを示す。

$$[K_{n+\theta}] \{\Delta u_{n+1}\} = \{\Delta \hat{F}_{n+1}\} \quad (2.3.46)$$

$$[K_{n+\theta}] = \int [B]^T [\hat{D}_{n+\theta}^P] [B] dV \quad (2.3.47)$$

$$\begin{aligned} \{\Delta \hat{F}_{n+1}\} &= \{F_{n+1}\} - \int [B]^T \{\sigma_{n+1}\} dV \\ &\quad - \int [B]^T [\hat{D}_{n+\theta}^P] \left\{ \left[\tilde{C}_{n+\theta} \right] \left(\{\sigma_{n+1}^i\} - \{\sigma_n\} \right) + \{\Delta \varepsilon_{n+1}^0\} + \{\Delta \varepsilon_{n+1}^c\} \right\} dV \quad (2.3.48) \\ &\quad - \int [B]^T \left(\{S_{n+\theta}\} \Delta T_{n+1} - \{Z_1\} - \{Z_2\} \right) dV \end{aligned}$$

ここで、(2.3.48)式の右辺に(2.3.42)式を代入すると荷重項は次のように書ける。

$$\begin{aligned} \{\Delta \hat{F}_{n+1}\} &= \{F_{n+1}\} + \{F'_{n+1}\} + \{F''_{n+1}\} - \int [B]^T \{\sigma_{n+1}\} dV \\ &\quad - \int [B]^T [\hat{D}_{n+\theta}^P] \left\{ \left[\tilde{C}_{n+\theta} \right] \left(\{\sigma_{n+1}^i\} - \{\sigma_n\} \right) + \{\Delta \varepsilon_{n+1}^0\} + \{\Delta \varepsilon_{n+1}^c\} \right\} dV \\ &\quad - \int [B]^T \left(\{S_{n+\theta}\} \Delta T_{n+1} - \{Z_1\} - \{Z_2\} \right) dV \quad (2.3.49) \\ &= \{\Delta \hat{F}'_{n+1}\} + \{F'''_{n+1}\} \end{aligned}$$

ただし、

$$\begin{aligned} \{\Delta \hat{F}'_{n+1}\} &= \{F'_{n+1}\} + \{F''_{n+1}\} - \int [B]^T \{\sigma_{n+1}\} dV \\ &\quad - \int [B]^T [\hat{D}_{n+\theta}^P] \left\{ \left[\tilde{C}_{n+\theta} \right] \left(\{\sigma_{n+1}^i\} - \{\sigma_n\} \right) + \{\Delta \varepsilon_{n+1}^0\} + \{\Delta \varepsilon_{n+1}^c\} \right\} dV \\ &\quad - \int [B]^T \left(\{S_{n+\theta}\} \Delta T_{n+1} - \{Z_1\} - \{Z_2\} \right) dV \quad (2.3.50) \end{aligned}$$

である。また、 $\{\Delta \hat{F}'_{n+1}\}$ は、 $\{F''_{n+1}\}$ の状態（非接触状態）の節点節重増分ベクトルである。

(2.3.46)式に(2.3.49)式を代入すると、

$$[K_{n+\theta}] \{\Delta u_{n+1}\} = \{\Delta \hat{F}'_{n+1}\} + \{F'''_{n+1}\} \quad (2.3.51)$$

となる。

図 2.42 に示すように、接触し合う 2 つの面をいくつかの節点の対(Contact node couple)で表現する。接触状態としては、非接触、固着およびすべりの 3 種を考える。

本コードではこのペレット／被覆管接触問題を以下に示す手順で取扱う。

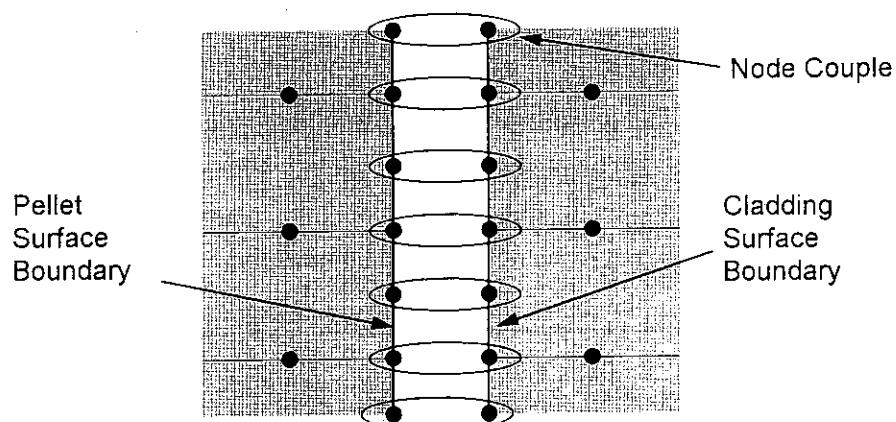


図 2.42 ペレットー被覆管接触対

- ① 接触し合う可能性のある各々の節点対について、(最初は前タイムステップの結果に基づいて) 接触状態(接触ないしは非接触)を仮定する。
- ② 仮定された(接触・非接触の)状態に対応する境界条件を使って剛性方程式を解く。
- ③ その解として求められた各々の節点変位、接触力から、各節点対の状態に関して①の仮定が正しいか否かを判断する。仮定した状態と計算された解とが矛盾する節点対が1つでもあれば、①に戻り、その節点対について接触・非接触の状態仮定を修正して②、③に進む。
- ④ このようにして、仮定と計算結果に矛盾がなくなるまで①→③のプロセスを繰り返す。ここで、非接触、接触(固着またはすべり)の変化が生じた場合には、計算結果が状態変化時刻に内挿され、その時刻以後について①に戻り、計算を継続する。

ペレットと被覆管の間に接触を生じていない場合、(2.3.41)式において、 $\{F_{n+1}^{(3),PC}\}$ および $\{F_{n+1}^{(6),PC}\}$ は0である。このとき後述するように $\{F_{n+1}^{(4),PP}\}$ および $\{F_{n+1}^{(8),AX}\}$ も0とするので、 $\{F_{n+1}'''_n\} = 0$ である。したがって、(2.3.51)式より、

$$[K_{n+\theta}] \{\Delta u_{n+1}\} = \{\Delta \hat{F}'_{n+1}\} \quad (2.3.52)$$

となる。

いま、1組の節点対がすべり状態にあり、他のすべての組は非接触状態であるとすると、 $\{F_{n+1}^{(3),PC}\}$ および $\{F_{n+1}^{(6),PC}\}$ は次のように書ける。

$$\{F_{n+1}^{(3),PC}\} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ U_{n+1} \\ V_{n+1} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.3.53)$$

$$\{F_{n+1}^{(6),PC}\} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ -U_{n+1} \\ -V_{n+1} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.3.54)$$

ここで、

$$V_{n+1} = \pm \mu U_{n+1} \quad (2.3.55)$$

V_{n+1} : 時刻における半径方向接触力

U_{n+1} : 時刻における軸方向接触力

μ : ペレット／被覆管摩擦係数

したがって、(2.3.52)式は次のようになる。

$$\begin{matrix} i \\ j \\ k \\ l \\ m \end{matrix} \left| \begin{array}{ccccccccc} & & & & & 0 & & & \\ & & & & & \vdots & & & \\ & & & & & 0 & & & \\ & & & & & -1 & \Delta u_{p,n+1} & & \\ & & & & & \pm \mu & \Delta v_{p,n+1} & & \\ & & & & & 1 & \Delta u_{c,n+1} & = & \hat{\Delta F}_{n+1}' \\ & & & & & \pm \mu & \Delta v_{c,n+1} & & \\ & & & & & 0 & & & \\ & & & & & \vdots & & & \\ & & & & & 0 & & & \\ & & & & & 0 & & & \\ 0 & \cdots & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & U_{n+1} & 0 \end{array} \right| \quad (2.3.56)$$

ただし、 $\Delta u_{p,n+1}$: 時刻 t_{n+1} におけるすべり状態節点対のペレット側節点半径方向変位増分

$\Delta v_{p,n+1}$: 時刻 t_{n+1} におけるすべり状態節点対のペレット側節点軸方向変位増分

$\Delta u_{c,n+1}$: 時刻 t_{n+1} におけるすべり状態節点対の被覆管側節点半径方向変位増分

$\Delta v_{c,n+1}$: 時刻 t_{n+1} におけるすべり状態節点対の被覆管側節点軸方向変位増分

である。上式で接触節点自由度 i,j,k,l 行の一次方程式は、

$$K_{n+\theta}^{(i)} \{ \Delta u_{n+1} \} = \hat{F}_{n+1}^{(1)} + U_{n+1} \quad (2.3.57)$$

$$K_{n+\theta}^{(j)} \{ \Delta u_{n+1} \} = \hat{F}_{n+1}^{(j)} \pm \mu U_{n+1} \quad (2.3.58)$$

$$K_{n+\theta}^{(k)} \{ \Delta u_{n+1} \} = \hat{F}_{n+1}^{(k)} - U_{n+1} \quad (2.3.59)$$

$$K_{n+\theta}^{(l)} \{ \Delta u_{n+1} \} = \hat{F}_{n+1}^{(l)} \pm \mu U_{n+1} \quad (2.3.60)$$

また、m行の一次方程式は

$$-\Delta u_{p,n+1} + \Delta u_{c,n+1} = 0 \quad (2.3.61)$$

である。

次に、1組の節点対が固着状態にあり、他のすべての組が非接触状態であるときの剛性方程式を例示すると次のようになる。

$$\begin{array}{c|ccccc|ccccc|ccccc} & & & & & & 0 & 0 & & & & & & \\ & & & & & & \vdots & \vdots & & & & & & \\ & & & & & & 0 & 0 & & & & & & \\ i & & & & & & -1 & 0 & \Delta u_{p,n+1} & & & & & \\ j & K_{n+\theta} & & & & & 0 & -1 & \Delta v_{p,n+1} & & & & & \\ k & & & & & & 1 & 0 & \Delta u_{c,n+1} & & & & & \\ l & & & & & & 0 & 1 & \Delta v_{c,n+1} & & & & & \\ m & 0 & \cdots & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ n & 0 & \cdots & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} = \begin{array}{c} \hat{F}_{n+1}' \\ U_{n+1} \\ V_{n+1} \end{array} \quad (2.3.62)$$

ただし、 $\Delta u_{p,n+1}$: 時刻 t_{n+1} における固着状態節点対のペレット側半径方向変位増分

$\Delta v_{p,n+1}$: 時刻 t_{n+1} における固着状態節点対のペレット側軸方向変位増分

$\Delta u_{c,n+1}$: 時刻 t_{n+1} における固着状態節点対の被覆管側半径方向変位増分

$\Delta v_{c,n+1}$: 時刻 t_{n+1} における固着状態節点対の被覆管側軸方向変位増分

である。上式で接触節点自由度 i,j,k,l 行の一次方程式（剛性方程式）は次のようになる。

$$K_{n+\theta}^{(i)} \{ \Delta u_{n+1} \} = \Delta \hat{F}_{n+1}^{(1)} + U_{n+1} \quad (2.3.63)$$

$$K_{n+\theta}^{(j)} \{ \Delta u_{n+1} \} = \Delta \hat{F}_{n+1}^{(j)} + V_{n+1} \quad (2.3.64)$$

$$K_{n+\theta}^{(k)} \{ \Delta u_{n+1} \} = \Delta \hat{F}_{n+1}^{(k)} - U_{n+1} \quad (2.3.65)$$

$$K_{n+\theta}^{(l)} \{ \Delta u_{n+1} \} = \Delta \hat{F}_{n+1}^{(l)} - V_{n+1} \quad (2.3.66)$$

また、m、n行の一次方程式は

$$-\Delta u_{p,n+1} + \Delta u_{c,n+1} = 0 \quad (2.3.67)$$

$$-\Delta v_{p,n+1} + \Delta v_{c,n+1} = 0 \quad (2.3.68)$$

である。

接触状態判定およびその後の処理は以下のように行う。

①前タイムステップで非接触状態であった場合

変位の重なりがないかをチェックする。すなわち、

$$g_{n+1} = g_n - \Delta u_{p,n+1} + \Delta u_{c,n+1} \quad (2.3.69)$$

ここで、

g_{n+1} : 時刻におけるギャップ幅

上式において、 $g_{n+1} > 0$ のときは収束、 $g_{n+1} \leq 0$ のときは次式により状態変化時刻 $t_{n+\alpha}$ まで時刻を戻す。

$$t_{n+\alpha} = \frac{t_{n+1} - t_n}{g_n - g_{n+1}} g_n + t_n \quad (2.3.70)$$

次に、時刻 $t_{n+\alpha}$ から t_{n+1} までの計算は、状態を「固着」に改めて再度行う。

②前タイムステップで固着していた場合

接触力ベクトルで状態変化を判定する。すなわち、

$$U_{p,n+1} < 0 \text{ かつ } |V_{p,n+1}| < \mu |U_{p,n+1}| \quad (2.3.71)$$

を満足するときは接触状態は収束、

$$U_{p,n+1} < 0 \text{ かつ } |V_{p,n+1}| \geq \mu |U_{p,n+1}| \quad (2.3.72)$$

のときは、仮定を「すべり」に改めて再計算する。また、

$$U_{p,n+1} \geq 0 \quad (2.3.73)$$

のときは、固着から非接触への変化であり、次式により状態変化時刻 $t_{n+\alpha}$ まで時刻を戻し、

$$t_{n+\alpha} = \frac{t_{n+1} - t_n}{U_{p,n} - U_{p,n+1}} U_{p,n} + t_n \quad (2.3.74)$$

時刻 $t_{n+\alpha}$ から t_{n+1} までは状態を「非接触」に改めて再計算を行う。

③前タイムステップですべり状態であった場合

接触力ベクトルで状態変化を判定する。すなわち、

$$U_{p,n+1} < 0 \text{ かつ } |V_{p,n+1}| \geq \mu |U_{p,n+1}| \quad (2.3.75)$$

を満足するときは接触状態は収束とする。ただし、

$$U_{p,n+1} < 0 \text{ かつ } |V_{p,n+1}| < \mu |U_{p,n+1}| \quad (2.3.76)$$

のときは状態を「固着」に改める。

また、次の条件を満たすときにも仮定していた状態を「すべり」から「固着」に改める。

$$U_{p,n+1} < 0 \text{ かつ } |v_{p,n+1}^*| \leq |v_{c,n+1}^*| \quad (2.3.77)$$

ここで、

$v_{p,n+1}^*$: 接触開始以後のペレット側節点軸方向変位

$v_{c,n+1}^*$: 接触開始以後の被覆管側節点軸方向変位

一方、次の条件を満たすときは、

$$U_{p,n+1} \geq 0 \quad (2.3.78)$$

「すべり」から「非接触」への変化であり、(2.3.74)式により状態変化時刻 $t_{n+\alpha}$ まで時刻を戻して変数の値を $t_{n+\alpha}$ に内挿し、時刻 $t_{n+\alpha}$ から t_{n+1} までは状態を「非接触」に改めて再計算を行う。

図 2.42 に示すような複数の接触節点対を持つ系を取り扱う場合、各々の節点対に関して独立に接触状態の収束を図ろうとすると、全体の系に関して収束を得るまでに数多くの繰り返しが必要となることが経験された。そこで、次のような付加条件を与えて収束のための繰り返し数削減を試みた。

- ① 接触状態にある節点対については、まず全て「固着」と仮定して解いてみる。
- ② この中で、 $|V_{p,n+1}| \geq \mu |U_{p,n+1}|$ の条件を満足する節点があった場合、この節点対およびこれより上方の位置にある節点対について、仮定を「すべり」と改める。
- ③ この時、収束を早くするためにすべりの向きを揃える。すなわち、摩擦力はペレット表面で全て下向き、被覆管内面で全て上向きとする。ただし、「すべり」と判断された節点

対の「固着」仮定時の接触力接線成分が全て逆向きの場合はすべりの向きを逆転させる。以上の方針により通常の場合 3 回以内の反復で全体の系に関する収束が得られるようになった。

(3) 軸方向荷重

着目セグメントより上部のペレットと被覆管の間のギャップ幅が所定の値以下になった場合、着目セグメントより上部のペレットと被覆管が固着し、着目セグメントの軸方向変位に制限を与える、すなわちロッキングが生じると仮定する。

調整パラメータ GAPLK
ロッキング状態を与える片側
ギャップ幅を GAPLK により調整
する。標準値は $3 \mu\text{m}$ である。

ロッキング状態をモデル化するために、着目セグメントのペレット上端面に分布する節点のうちで最大の軸方向座標値を持つ節点 i の変位増分と、被覆管の境界面（図 2.41 における境界(8)）の変位増分とを等しく設定することにより、ペレットと被覆管に軸方向荷重を発生させる。これをロッキング条件と呼ぶ。

着目セグメントのペレットとその上部ペレット相互の接触状態の判定およびその後の処理手順は次の通りである。

着目セグメントのペレット端面上の他の節点 j の軸方向座標が節点 i の軸方向座標を越えた場合、節点 j の軸方向変位増分も節点 i と同様に、境界(8)の軸方向変位増分に等しくする。すなわち、ロッキング条件を設定する。この場合、次式により状態変化時刻 $t_{n+\alpha}$ まで時刻を戻す。

$$t_{n+\alpha} = \frac{\bar{Z}_{i,n} - Z_{j,n}}{Z_{j,n+1} - Z_{j,n} - (\bar{Z}_{i,n+1} - \bar{Z}_{i,n})} (t_{n+1} - t_n) + t_n \quad (2.3.79)$$

ここで

$\bar{Z}_{i,n}, \bar{Z}_{i,n+1}$: 時刻 t_n より t_{n+1} におけるロッキング状態の節点 i の軸方向座標

$Z_{j,n}, Z_{j,n+1}$: 時刻 t_n より t_{n+1} における節点 j の軸方向座標

である。

時刻 $t_{n+\alpha}$ から t_{n+1} までは、節点 j の軸方向自由度を節点 i の軸方向自由度と共通の自由度として、被覆管上端面（境界(8)）の軸方向自由度と共に自由度で扱い、改めて計算する。

この方法により一般にはロッキング状態は、図 2.41 において境界(4)上で軸方向荷重を支えるペレット節点群（これらはまとめて軸方向自由度 1 として扱われる）と境界(8)上の被覆管節点群（同様に軸方向自由度 1）の軸方向変位増分を等しくする（共通の自由度として扱う）境界条件を設定することにより実現する。

ところで、接触状態にある節点の時刻 t_{n+1} における軸方向接触力は(2.3.1)式により求められる。
すなわち、

$$\{F_{n+1}\} = \int [B]^T \{\sigma_{n+1}\} dV \quad (2.3.1)$$

において、境界(4)に作用する荷重は軸方向接触力 $\{F_{n+1}^{(4),PP}\}$ のみであるから、

$$\{F_{n+1}^{(4),PP}\} = \{F_{n+1}\} = \int [B]^T \{\sigma_{n+1}\} dV \quad (2.3.80)$$

である。

上式で求められるある節点の軸方向接触力を V_{n+1} と書く。 $V_{n+1} < 0$ であれば、この節点におけるロッキング状態が持続される。 $V_{n+1} \geq 0$ の場合には、ロッキング状態が解除されたと判定して、次式により時刻を $t_{n+\alpha}$ まで戻して解除時刻を求める。

$$t_{n+\alpha} = \frac{V_n}{V_n - V_{n+1}} (t_{n+1} - t_n) + t_n \quad (2.3.81)$$

時刻 $t_{n+\alpha}$ から t_{n+1} までは、この節点の軸方向自由度を共通自由度より除外して計算する。

なお、ペレット端面上の全ての点での V が正になるとロッキング状態は解除される。

2回目以降のロッキング条件の設定は、前回ロッキング条件が解除されたときの軸方向座標値に、着目セグメントのペレット端面上のいざれかの節点の軸方向座標値が再び至った場合にその節点に対して行われる。

なお、ロッキング条件設定時に被覆管上端面(8)にかかる荷重 $\{F^{(8)}\}$ は

$$\{F^{(8)}\} = \{F^{(8),R}\} + \{F^{(8),AX}\} + \{F^{(8),W}\} + \{F^{(8),G}\} \quad (2.3.82)$$

$\{F^{(8)}\}$: 境界(8)にかかる軸方向荷重

$\{F^{(8),R}\}$: 境界(8)で軸方向 1 自由度としたことによる節点力

$\{F^{(8),AX}\}$: 境界(8)でのロッキング条件による軸方向引張荷重

$\{F^{(8),W}\}$: 冷却水圧による軸方向荷重

$\{F^{(8),G}\}$: プレナムガス圧による軸方向荷重

である。

2.4 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)

2.4.1 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 ₂ 熱伝導度 (1)	MATPRO-Version 09	使用条件	ref.
0~1,650°Cに対して $K = \left\{ \frac{1 - \beta(1 - D)}{1 - 0.05\beta} \right\} \cdot \left\{ \frac{40.4}{464 + T} + 1.216 \times 10^{-4} \exp(1.867 \times 10^{-3} T) \right\}$		標準値: IPTHCN=1	
1,650~2,840°Cに対して $K = \left\{ \frac{1 - \beta(1 - D)}{1 - 0.05\beta} \right\} \cdot \left\{ 0.0191 + 1.216 \times 10^{-4} \exp(1.867 \times 10^{-3} T) \right\}$			8
K : UO ₂ ペレットの熱伝導度 (W/cm · K) D : UO ₂ 理論密度比 T : 温度 (°C) β : 気孔率係数、 $\beta = 2.58 - 0.58 \times 10^{-3} T$			
UO ₂ 熱伝導度 (2) Washington $K = F \cdot \{(0.040 + 2.57 \times 10^{-4} \cdot T)^{-1} + 72.6 \times 10^{-12} \cdot T^3\}$ (W/mK) $F = 1.0 - 2.5 \cdot P$ P : porosity=1.0 - (UO ₂ density/Theoretical density) T : 温度 (K)		IPTHCN=2	16
UO ₂ 熱伝導度 (3) Hirai $K = K_{95\% TD} \cdot (1 - \eta p) / (1 - 0.05 \cdot \eta)$ (W/mK) $K_{95\% TD} = (2.35 \times 10^{-2} + 2.55 \times 10^{-4} \cdot T)^{-1} + 3.57 \times 10^{-12} \cdot T^3$ $\eta = 2.6 - 5 \times 10^{-4} \cdot T$ (8) P : porosity T : 温度 (K)		IPTHCN=3	17
UO ₂ 熱伝導度 (4) Halden $K = F / \{0.1148 + 0.0035 \cdot B + (2.475 \times 10^{-4} - 8 \times 10^{-7} \cdot B)T\} + F \cdot 0.0132 \exp(0.00188 \cdot T)$ (W/mK) $F = (1 - \eta p) / (1 - 0.05 \cdot \eta)$ $\eta = 2.6 - 5 \times 10^{-4} \cdot T$ (8) P : porosity B : 燃焼度 (MWd/kgUO ₂) T : 温度 (°C)		IPTHCN=4	18

UO ₂ 熱伝導度 (5)	Modified Hirai		
$K = K_{95\%TD} \cdot (1 - \eta p) / (1 - 0.05 \cdot \eta) \quad (W/mK)$ $K_{95\%TD} = \left\{ (2.35 \times 10^{-2} + 3.5 \times 10^{-3} \cdot B) + (2.55 \times 10^{-4} \cdot T - 8 \times 10^{-7} \cdot B) \right\}^{-1}$ $+ 3.57 \times 10^{-12} \cdot T^3$ $\eta = 2.6 - 5 \times 10^{-4} \cdot T \quad (8)$	IPTHCN=5 EXBURN		
<i>P</i> : porosity <i>T</i> : 温度 (K) <i>B</i> : 燃焼度 (MWd/kg-U)			
UO ₂ 熱伝導度 (6)	Forsberg		
$K = F \left\{ 0.047 + 1.73 \times 10^{-3} \cdot B + (2.5 \times 10^{-4} - 5.41 \times 10^{-8} \cdot B)T \right\}^{-1}$ (W/mK) $F = 1.0 - \eta \cdot p$ $\eta = 2.6 - 5 \times 10^{-4} \cdot T \quad (8)$	IPTHCN=6 19		
<i>P</i> : porosity <i>T</i> : 温度 (K) <i>B</i> : 燃焼度 (MWd/kg-U)			
UO ₂ 熱伝導度 (7)	Kjaer-Pedersen		
$K = 93 / (0.0224 \cdot T + 1.1 + 56 \cdot P + 3 \cdot G(B)) + 2.5 \cdot 10^{-14} \cdot T^4$ $B \leq 10 \quad G = (B/10)^2$ $B \geq 10 \quad G = ((B - 7.5)/10)^{0.5}$	IPTHCN=7 20		
<i>P</i> : porosity <i>T</i> : 温度 (K) <i>B</i> : 燃焼度 (MWd/kg-U)			
MOX 熱伝導度	Martin	使用条件	Ref.
1) 12% ≤ PuO ₂ ≤ 30% の場合			
$K_{MOX} = (0.037 + 3.33y + 2.37 \times 10^{-4} T)^{-1} + 78.9 \times 10^{-12} T^3$			
2) 0% ≤ PuO ₂ ≤ 12% の場合			
$K(f) = K_u \cdot (1 - f / 0.12) + K_{MOX} \cdot f / 0.12$ ここで <i>K</i> : 熱伝導度 (W/m · K) <i>T</i> : 温度 (K) <i>y</i> : MO _{2-y} <i>K_u</i> : UO ₂ 熱伝導度 (W/m · K)	MOX=1 21		
$K_u = \left[(0.035 + 2.25 \cdot 10^{-4} \cdot T)^{-1} + 83.0 \cdot 10^{-12} \cdot T^3 \right] \cdot (1+z)$ $(z: UO_{2-z}, \quad 0 \leq z \leq 0.05)$			

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 ₂ 重量比 f	0.0
Y	MO _{2-y} 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 : Gd₂O₃ 濃度の関数 (下表)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Gd₂O₃ (-)</th> <th>a</th> <th>b</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.0</td> <td>2.32733×10^{-4}</td> <td>1.180229×10^{-1}</td> </tr> <tr> <td>0.03</td> <td>2.131412×10^{-4}</td> <td>1.732423×10^{-1}</td> </tr> <tr> <td>0.057</td> <td>1.996481×10^{-4}</td> <td>2.069985×10^{-1}</td> </tr> <tr> <td>0.085</td> <td>1.961735×10^{-4}</td> <td>2.342200×10^{-1}</td> </tr> </tbody> </table> <p>Gd₂O₃ の濃度に対する a, b の値の補間式は $K = rA^{Gd}$ 式に、上記のテーブルより前後する Gd₂O₃ 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 ₂ O ₃ (-)	a	b	0.0	2.32733×10^{-4}	1.180229×10^{-1}	0.03	2.131412×10^{-4}	1.732423×10^{-1}	0.057	1.996481×10^{-4}	2.069985×10^{-1}	0.085	1.961735×10^{-4}	2.342200×10^{-1}	IGD=1	22
Gd ₂ O ₃ (-)	a	b															
0.0	2.32733×10^{-4}	1.180229×10^{-1}															
0.03	2.131412×10^{-4}	1.732423×10^{-1}															
0.057	1.996481×10^{-4}	2.069985×10^{-1}															
0.085	1.961735×10^{-4}	2.342200×10^{-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 ₂ O ₃ 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 ₂ 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 (標準値) IPTHEX=1	8
$\frac{\Delta L}{L}$: 線熱膨張			
T : 温度 (°C)			
UO ₂ 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 ₂ 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 ₂ 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) UO₂密度

UO₂の理論密度の物性値を示す。

UO ₂ 密度	MATPRO-Version 09	使用条件	ref.
$\rho = 10.96$		常時	8
ρ : UO ₂ 理論密度 (g/cm ³)			

(4) UO₂ヤング率

UO₂のヤング率の物性式を示す。

UO ₂ 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	8

(5) UO₂ ポアソン比

UO₂のポアソン比の物性値を示す。

UO ₂ ポアソン比	MATPRO-Version 09	使用条件	ref.
$\nu = 0.316$		常時	
ν : UO ₂ ポアソン比			8

(6) UO₂ クリープ

UO₂クリープ速度の物性式を示す。

UO ₂ クリープ	MATPRO-Version 09	使用条件	ref.
$\varepsilon = \frac{(A_1 + A_2 F)\sigma \exp(-Q_1 / RT)}{(A_3 + D)G^2} + \frac{A_4 \sigma^{4.5} \exp(-Q_2 / RT)}{(A_5 + D)} + A_6 \sigma F \exp(-Q_3 / RT)$ ε : 定常クリープ速度 (1/h) $A_1 = 9.728 \times 10^6$ $A_2 = 3.24 \times 10^{-12}$ $A_3 = -87.7$ $A_4 = 1.376 \times 10^{-4}$ $A_5 = -90.5$ $A_6 = 9.24 \times 10^{-28}$ $Q_1 = 90,000 (\text{cal/mol})$ $Q_2 = 132,000 (\text{cal/mol})$ $Q_3 = 5,200 (\text{cal/mol})$ F : 核分裂率 $8.4 \times 10^{17} \sim 1.18 \times 10^{20} (\text{fiss./m}^3 \cdot \text{sec})$ σ : 応力 1,000~16,000 (psi) T : 温度 713~2,073 (K) D : 密度 92~98 (%TD) G : 粒径 4~35 (μm) R : ガス定数 1.987 (cal/mol · K)	常時	8	

なお、UO₂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
TCRMX	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) UO₂スウェリング

UO₂スウェリングの物性式のオプションを示す。UO₂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 ₂ スウェリング (1)	Chubb	使用条件	ref.
(ガスバブルスウェリング)			
$\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^{ss} = 4.396 \times 10^2 \exp\left(-\frac{1.645 \times 10^4}{T_s}\right)$		IFSWEL=0 (標準値)	23
$T_s = T - 100$			
$\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^{ss}$: 10 ²⁰ fissions/cm ³ 当りの体積ガスバブルスウェリング			
T : 温度 (K)			
UO ₂ スウェリング (1')	FEMAXI-III		ref.
(固体FPスウェリング)			
$\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^{ss} = 0.0025$			1
$\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^{ss}$: 10 ²⁰ fissions/cm ³ 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 平均接触圧力 (Pa) (変形モデルで使用)	-3 × 10 ⁷
SPCON	ガスバブルスウェリングの発生を抑える 平均接触圧力 (Pa) (熱モデルで使用)	-10 ⁶

UO ₂ スウェリング (2)	Speight	使用条件	ref.
(ガスバブルスウェリング)			
<u>粒内ガスバブルスウェリング</u>			
$\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^{gs1} = \frac{4}{3} \pi a^3 N$		IFSWEL=1	9
a : 粒内バブル半径 (cm)			
N : 単位体積当たりのバブル数 (1/cm ³)			
<u>粒界ガスバブルスウェリング</u>			
$\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^{gs2} = Bg \frac{3\pi}{2R} h \bar{a}^3 \left\{ 1 + \frac{h^2}{3} \right\}$			
Bg : 単位面積当たりのバブル数 (1/cm ³)			
R : 結晶粒半径 (cm)			
\bar{a} : 粒内バブル半径 (cm)			
h : 定数 (=1)			
$\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^{gs} = \left(\frac{\Delta V}{V}\right)^{gs1} + \left(\frac{\Delta V}{V}\right)^{gs2}$			
$\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^{gs}$: 体積ガスバブルスウェリング			
$\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^{gs1}$: 体積粒内ガスバブルスウェリング			
$\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^{gs2}$: 体積粒界ガスバブルスウェリング			
UO ₂ スウェリング (1')	FEMAXI-III		ref.
(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 ²⁰ fissions/cm ³ 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 \bar{a} は以下の式により求める。</p> $P_{in} = \frac{m}{v} RT = \frac{2r}{\bar{a}} + P_{out}$ <p>ここで、 P_{in} : 粒界バブル内圧力 m : 1バブル中のガスモル数 v : バブル体積 $\left(= \pi h \bar{a}^3 \left(1 + \frac{h^2}{3} \right) \right)$</p> <p>$R$: 気体定数 T : 温度 r : 表面張力 \bar{a} : 粒界バブル半径 P_{out} : 粒界バブル外圧力</p> <p>である。ここで P_{out} は、</p> $P_{out} = P_{gas} + P_{fc} \cdot FACP$ <p>で与える。</p> <p>ここで、 P_{gas} : プレナム圧力 P_{fc} : 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 ₂ スウェーリング (3)	MATPRO-Version 09	使用条件	ref.
中心温度範囲 T (°C)	スウェーリング率 (%/10 ²⁰ fiss/cm ³)		
$T \leq 1,400$	0.28	IFSWEL=2	8
$1,400 \leq T \leq 1,800$	$0.28[1 + 0.00575(T - 1,400)]$		
$1,800 \leq T \leq 2,200$	$0.28[3.3 - 0.004(T - 1,800)]$		
$2,200 < T$	0.476		

UO ₂ スウェーリング (4)	Halden	使用条件	ref.
体積スエーリング率 : $\left(\frac{\Delta V}{V} \right) = 0.5 \% / 10 \text{MWd/kgUO}_2$		IFSWEL=3	36

(8) U_0 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、 α はホットプレスパラメータである⁽¹⁵⁾。

$$\bar{\sigma} = \left[\frac{3}{2(F+G+H)} \left\{ H(\sigma_r - \sigma_z)^2 + F(\sigma_z - \sigma_\theta)^2 + G(\sigma_\theta - \sigma_r)^2 + 2N\tau^2 \right\} + 3\alpha(\sigma_r + \sigma_z + \sigma_\theta)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.4.1)$$

$$\{\Delta\varepsilon_{n+1}^P\} = \Delta\bar{\varepsilon}_{n+1}^P \left\{ \frac{\partial\bar{\sigma}}{\partial\sigma} \right\}_{n+\theta} \quad (2.4.2)$$

ペレット材質の等方性 ($H = F = G = 1, N = 3$) を仮定すると、(2.4.1)式より

$$\frac{\partial\bar{\sigma}}{\partial\sigma_r} = \frac{3}{2\bar{\sigma}} \left\{ \frac{2\sigma_r - \sigma_z - \sigma_\theta}{3} + 2\alpha(\sigma_r + \sigma_z + \sigma_\theta) \right\} \quad (2.4.3)$$

が成り立つ。したがって、

$$\left\{ \frac{\partial\bar{\sigma}}{\partial\sigma} \right\}_{n+\theta} = \frac{1}{\bar{\sigma}_{n+\theta}} \begin{bmatrix} 1+3\alpha & -0.5+3\alpha & -0.5+3\alpha & 0 \\ & 1-3\alpha & -0.5+3\alpha & 0 \\ Sym. & & 1+3\alpha & 0 \\ & & & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \left\{ \sigma_{n+\theta} \right\} \quad (2.4.4)$$

である。これを(2.4.2)式に代入し、整理すると、

$$\{\Delta\varepsilon_{n+\theta}^P\} = \frac{(1+3\alpha)\Delta\bar{\varepsilon}_{n+1}^P}{\bar{\sigma}_{n+\theta}} \begin{bmatrix} 1 & -v^P & -v^P & 0 \\ & 1 & -v^P & 0 \\ & & 1 & 0 \\ Sym. & & & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \left\{ \sigma_{n+\theta} \right\} \quad (2.4.5)$$

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、

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_{h,n+1}^P &= \Delta\varepsilon_{n+1}^{P,r} + \Delta\varepsilon_{n+1}^{P,z} + \Delta\varepsilon_{n+1}^{P,\theta} \\ &= \frac{(1+3\alpha)\Delta\bar{\varepsilon}_{n+1}^P}{\bar{\sigma}} (1-2v^P)(\sigma_r + \sigma_z + \sigma_\theta) \\ &= \frac{9\alpha\Delta\bar{\varepsilon}_{n+1}^P}{\bar{\sigma}} (\sigma_r + \sigma_z + \sigma_\theta) \end{aligned} \quad (2.4.6)$$

である。

またクリープの場合も(2.4.6)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、

$$\Delta\varepsilon_{h,n+1}^c = \frac{9\alpha\Delta\varepsilon_{n+1}^c}{\sigma} (\sigma_r + \sigma_z + \sigma_\theta) \quad (2.4.7)$$

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ひずみ変化 (=ホットプレス) $\Delta\varepsilon_{h,n+1}$ は次のように表される。

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_{h,n+1} &= \Delta\varepsilon_{h,n+1}^P + \Delta\varepsilon_{h,n+1}^c \\ &= \frac{9\alpha}{\sigma} (\Delta\varepsilon_{n+1}^P + \Delta\varepsilon_{n+1}^c) (\sigma_r + \sigma_z + \sigma_\theta) \end{aligned} \quad (2.4.8)$$

なお、UO₂ホットプレスは、ホットプレスパラメータ α が調整パラメータである。

変数名	内容	標準値
BETAX	UO ₂ のホットプレスパラメータ α	0.002

(9) UO₂焼きしまり

UO₂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 ₂ 焼きしまり (1)	FEMAX-III	使用条件	ref.
$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta V^{\max}}{V} (1 - e^{-cBu})$ $\frac{\Delta V}{V}$: 焼きしまりによる体積収縮 $\frac{\Delta V^{\max}}{V}$: 焼きしまりによる最大体積収縮 Bu : 燃焼度 (Mwd/t-UO ₂)	IDENSF=0 (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 ₂) $C = \frac{2.3025}{SBU}$ で与えられる。 ただし、 $\exp(-2.3025) = 0.1$ である。	2500.0

UO ₂ 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>TD : UO₂の理論密度比 (%TD) TS : 焼結温度 (°C) (=TDNSF)</p> <p>ただし、$\frac{\Delta L}{L} = 3\%$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>BU : 燃焼度 (GWd/t-U)</p>	IDENSF=1	24	

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 ₂ 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 $\Delta\rho(g/cm^3)$ は</p> $\Delta\rho = 0 \quad (BU \leq BU_1)$ $\Delta\rho = m \log(BU) + b \quad (BU_1 < BU < BU_2)$ $\Delta\rho = \Delta\rho_{sn} \quad (BU \geq BU_2)$ <p>$\Delta\rho_{sn}$: 炉外熱処理 (1,700°C × 24h) での密度増加 (g/cm³) (=DMAX)</p> <p>BU : 燃焼度 (MWd/t)</p> <p>$BU_1 = 20\text{MWd/t}, \quad BU_2 = 2000\text{MWd/t}$</p> <p>m, b : 各燃焼度範囲で 3 つの式を連続にする定数</p>	IDENSF=2	25	

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 × 2 4 h) での相対密度増加 (%)	1.0

UO ₂ 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> $\Delta\rho$: 炉内焼きしまり量 (%TD) (=DMAX) M : 烤きしまり速度定数 (%TD-cm) A : 粒成長速度定数 (cm) D_{irr}^0 : 照射拡散定数 = 1.27×10^{-29} (m³/fiss.) \dot{F} : 核分裂率 (fiss./cm³.sec) t_{irr} : 照射時間 (sec) $\dot{F}t_{irr}$: 燃焼度 (fiss./cm³) G_0 : 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> G : 热処理後の結晶粒径 (cm) (=GG) t : 热処理時間 (sec) (=SITIM) $\Delta \rho_{th}$: 热処理による密度変化 (%TD) D_0 : 热拡散定数 2.32×10^{-5} (cm²/sec) Q : 82,000 cal/mol R : ガス定数 1.987 (cal/mol/K) T : 处理温度 (K) </p>	IDENSF=3	26	

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	热処理後の結晶粒径 (m)	10^{-5}
GGO	初期結晶粒径 (m)	8×10^{-6}
SITIM	热処理時間 (hr)	24.0

UO ₂ 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 $\frac{\Delta V}{V} = - \left[0.01420(1 - \exp(-6.7943 \cdot BU)) + 0.00793(1 - \exp(-1.1434 \cdot BU)) \right] \cdot ADST$ BU:燃焼度(MWd/kgUO ₂) ADST:調整ファクター(=0.6)		IDENSF=4	36

(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られることが考えられる。この効果を初期リロケーションと呼ぶ。本コードでは、初期リロケーションは、燃焼度0、線出力0の冷却水条件下(hot stand-by)におけるギャップ幅に比例すると仮定し、

$$REL = \alpha \cdot (r_{ci}^c - r_{pi}^c) \quad (2.4.9)$$

とおく。ここで、 r_{ci}^c および r_{pi}^c はそれぞれ hot stand-by における被覆管内半径およびペレット半径(cm)である。 α は、実験データとの照合を介して定められる経験的パラメータで、リロケーションパラメータと呼ばれる。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 α (熱モデル用)	0.2
FRELOC	リロケーションパラメータ α (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) UO₂塑性

UO₂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 ₂ 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 (標準値)	27	
σ_y : 降伏応力 (kg/mm ²)			
H' : 接線剛性 (kg/mm ²)			
T : 温度 (°C)			
UO ₂ 塑性 (2)	Rodford	IFY=0	*
$\sigma_y = 1176.1 - 1.688 \cdot T + 8.179 \times 10^{-4} \cdot T^2$ $- 1.293 \times 10^{-7} \cdot T^3$			
$H' = 0.0$			
σ_y : 降伏応力 (MPa)			
H' : 接線剛性			
T : 温度 (°C)			

(12) UO₂比熱

UO₂の比熱の物性式を示す。

UO ₂ 比熱	MATPRO-Version 09	使用条件	ref.
$C_p = 15.496 \left[\frac{K_1 \theta^2 \exp(\theta / T)}{T_2 [\exp(\theta / T) - 1]^2} + 2K_2 T + \frac{K_3 E_D}{RT^2} \exp(-E_D / RT) \right]$		常時	8
C_p : UO ₂ 比熱 (J/kg · K)			
$K_1 = 19.145$ (cal/mol · K)			
$K_2 = 7.8473 \times 10^{-4}$ (cal/mol · K ²)			
$K_3 = 5.6437 \times 10^6$ (cal/mol)			
$\theta = 535.285$ (K)			
$E_D = 37,694.6$ (cal/mol)			
T : 温度 (K)			
$R = 1.987$ (cal/mol · K)			

(13) UO₂粒成長

UO₂粒成長の物性値は以下のオプションから選択する。

UO ₂ 粒成長	修正 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 (μ m)</p> <p>t : 時間 (h)</p> <p>K : 速度定数 (μ m²/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_m : 限界粒径 (μ m)</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_f : 粒界での FP ガス原子密度 (atoms/cm²)</p> <p>N_f^{max} : 粒界での FP ガス原子密度の飽和値 (atoms/cm²)</p>	IGRAIN=0 (標準値)	original: 13	

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 ₂ 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 (μ m)</p> <p>t : 時間 (h)</p> <p>k : 速度定数 (μ m²/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		13

UO ₂ 粒成長 (3)	MacEwan		
$D^2 - D_o^2 = k_o t^{0.8} \exp(-87,000 / RT)$		IGRAIN=2	28
D : 時間 t における粒径 (μ m)			
D_o : 初期粒径 (μ m)			
k_o : 比例定数 ($k_o = 3.9 \times 10^{10}$)			
t : 時間 (h)			
R : ガス定数 1.987 (cal/mol · K)			
T : 温度 (K) ; 温度範囲 : 1,555~2,440°C			
UO ₂ 粒成長 (4)	Lyons		
$D^3 - D_o^3 = k_o e^{-Q/RT} \cdot t$		IGRAIN=3	29
D : 時間 t における粒径 (μ m)			
D_o : 初期粒径 (μ m)			
k_o : 速度定数 (μ m ³ /h)			
Q : 粒成長に必要な活性化エネルギー (cal/mol)			
$R = 1.987$ cal/mol · K)			
T : 温度 (K)			
t : 時間 (h)			
$K_o = \exp(5.096 + 2.476 \times 10^{-4} \cdot Q)$			
Mac Ewan の実験データに対して $Q=119,000$ (cal/mol)			
UO ₂ 粒成長 (5)	MATPRO-Version 09	使用条件	ref.
$D^4 - D_o^4 = 6.18 \times 10^{13} e^{-92,400/RT} \cdot t$		IGRAIN=4	8
D : 時間 t における粒径 (μ m)			
D_o : 初期粒径 (μ m)			
$R = 1.987$ (cal/mol · K)			
T : 温度 (K)			
t : 時間 (h)			

(14) 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 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 (標準値)	
FP ガス放出率 (2)	温度依存モデル				
$f = \frac{1}{V} \sum_i a_i V_i$ V_i : UO_2 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 $V = \sum_i V_i$ a_i : 領域 i における放出率				IGASP=1 (各モデル共に共通)	*
提案者	データ			(Nelson モデル)	
R.C.Nelson	i = 1 = 2 = 3	>1,900°C 1,650~1,900°C <1,650°C	100% 20% 0%	IGAS=1 (森島 モデル)	
森 島	i = 1 = 2 = 3	>1,900°C 1,650~1,900°C <1,650°C	100% 20% 0.5%	IGAS=2 (Lewis モデル)	
W.B.Lewis	i = 1 = 2 = 3 = 4	>1,600°C 1,300~1,600°C 1,000~1,300°C <1,000°C	95% 60% 10% 0.5%	IGAS=3 (Karsten モデル)	
G.Karsten	i = 1 = 2 = 3	>1,700°C 1,300~1,700°C <1,300°C	95% 50% 10%	IGAS=4	

(15) 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	使用条件	ref.
$T_m = T_u - 5.414P + 0.007468P^2 - 0.0032Bu$ T_m : ペレット融点 (°C) T_u : UO_2 の未照射材の融点 (=2,800°C) P : PuO_2 のモル分率 (%) 、 Bu : 燃焼度 (MWd/t)		常時	30

2.4.2 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 $k = 7.51 + 2.09 \times 10^{-2} T - 1.45 \times 10^{-5} T^2 + 7.67 \times 10^{-9} T^3$ k : 热伝導度 (W/m · K) T : 温度 (K)		常時	8

(2) 被覆管酸化膜の熱伝導度

ZrO ₂ 熱伝導度	MATPRO-A	使用条件	ref.
$k = 1.5$ (W/m · K)		常時	31

(3) ジルカロイの熱膨張

軸方向の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 軸方向の熱膨張 : (Subcode CATHEX) $\Delta L / L_o = -2.506 \times 10^{-5} + 4.441 \times 10^{-6} T$ したがって熱膨張係数 : $\alpha = 4.441 \times 10^{-6}$ 半径方向熱膨張 : (Subcode CDTHEX) $\Delta D / D_o = -2.373 \times 10^{-4} + 6.721 \times 10^{-6} T$ したがって $\alpha = 6.721 \times 10^{-6}$ T : 温 度 (°C) α : 热膨張係数 (°C ⁻¹)		ICATHX=0 (標準値)	8
ジルカロイ熱膨張 (2)	Scott		
21～429°Cに対して 軸方向の熱膨張率 : $\Delta L / L_o = 42.53230 + 3.96753T$ $(\text{in/in}) \times 10^{-6}$ T : 温 度 (°C)		ICATHX=1	*

(5) 被覆管ヤング率

ジルカロイヤング率	Fisher	使用条件	ref.
$E = [9.900 \times 10^5 - 566.9 \times (T - 273.15)] \times 9.8067 \times 10^4$ E : ヤング率 (Pa) T : 溫度 (K)		常時	32

(6) 被覆管ポアソン比

ジルカロイポアソン比	Fisher	使用条件	ref.
$\nu = 0.3303 + 8.376 \times 10^{-5} (T - 273.15)$ T : 溫度 (K)		常時	32

(7) ジルカロイクリープ

ジルカロイクリープ	MATPRO-Version 09	使用条件	ref.
照射下クリープ式 $\dot{\varepsilon} = K\phi(\sigma + Be^{C\sigma}) \exp(-10,000 / RT)t^{-\frac{1}{2}}$ $\dot{\varepsilon}$: 二軸クリープひずみ速度 (m/m · sec) $K = 5.129 \times 10^{-29}$ $B = 7.252 \times 10^{-2}$ $C = 4.967 \times 10^{-8}$ $R = 1.987$ (cal/mol · K) T : 溫度 (K) t : 時間 (sec) ϕ : 高速中性子数 (n/m ² · sec) $E > 1.0$ MeV σ : 周方向応力 (N/m ²)		常時	8

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⁽³³⁾。Pugh の方法の大要は次のようにある。

- 1) クリープ硬化は ε^H で表されているとし、

$$\{\dot{\varepsilon}_c\} = \left\{ \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma} \right\} f(\bar{\sigma}, \bar{\varepsilon}^H, T) \quad (2.4.9)$$

とする。

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

$$\hat{\varepsilon} = \varepsilon_H, \quad \bar{\varepsilon}^H = 0 \quad (2.4.10)$$

とする。

3) 第2回目以降の反転時には、

$$\bar{\varepsilon}^H \geq \hat{\varepsilon} \quad \text{なら} \quad \hat{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}^H = 0, \quad \bar{\varepsilon}^H = 0$$

$$\bar{\varepsilon}^H < \hat{\varepsilon} \quad \text{なら} \quad \bar{\varepsilon}^H = \hat{\varepsilon} - \bar{\varepsilon}^H$$

とする。

これらを図示すれば図2.43のようになる。

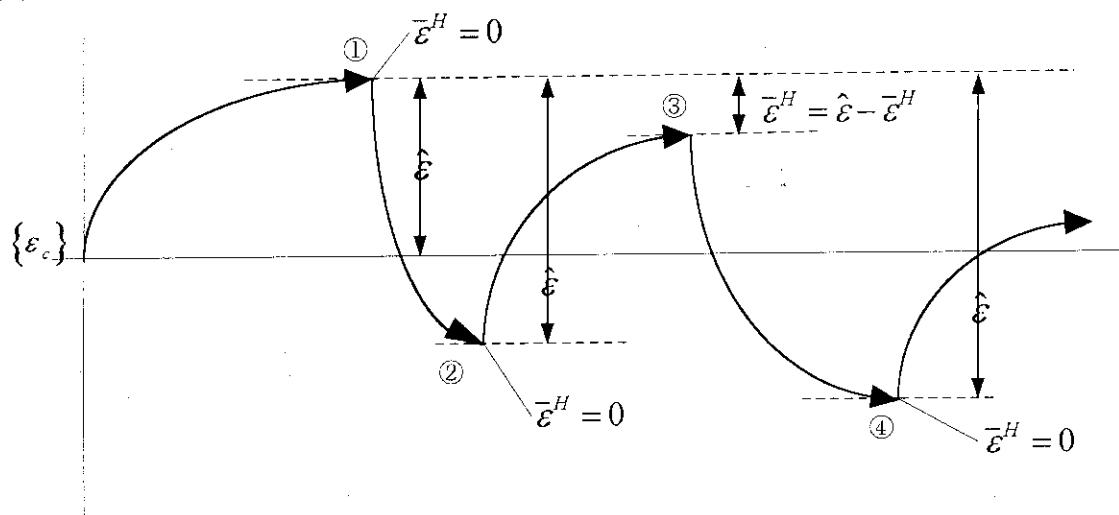


図2.43 応力の反転によるクリープひずみの反転

なお、応力反転の判定は、クリープ式が

$$\{\dot{\varepsilon}_c\} = \left\{ \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma} \right\} f(\bar{\sigma}, \bar{\varepsilon}^H, T), f \geq 0 \quad (2.4.11)$$

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、 $\{\dot{\varepsilon}_c\}$ の成分のスカラー一積の符号による。

(8) ジルカロイ塑性

ジルカロイ歪硬化曲線式の物性式を示す。

ジルカロイ歪硬化曲線式	計算条件	ref.
$\sigma = K\varepsilon^n$ σ : 真応力 (kg/mm^2) ε : 真ひずみ n : 歪硬化指数 $K = \sigma_y + 33.44(1 - \exp(-B\phi t))^{\frac{1}{2}} \quad (\text{kg}/\text{mm}^2)$ $B = 2.92 \times 10^{-21} \exp(1 - 1.6 \times 10^{-14} \phi)$ ϕ : 高速中性子束 ($\text{n}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$) $E > 1 \text{ MeV}$ σ_y : 降状応力 (kg/mm^2) = 21.60 - 0.0213 · T (再焼結材) = 31.32 - 0.0213 · T (応力除去材) $n = 0.0504 + 0.0001435 \cdot T$ 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

(9) 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.
$\frac{\Delta L}{L} = A[\exp(240.8 / T)][\phi t]^{\frac{1}{2}}[1 - 3f_z][1 + 2.0CW]$ $\frac{\Delta L}{L}$: 照射成長 (-) $A = 1.407 \times 10^{-16} (n/m^2)^{\frac{1}{2}}$ T : 温度 ($^\circ\text{K}$) ϕt : 高速中性子照射量 (n/m^2) ($E \geq 1 \text{ MeV}$) f_z : 軸方向ファクター CW : コールドワーク	ICAGRW =1		8

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.
$\frac{\Delta L}{L_o} = 0.1(\phi \cdot t / 10^{21})^n$			
$\frac{\Delta L}{L_o}$: 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	34
$\frac{\Delta L}{L_o}$: 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 ($= 5 \times 10^{-14}$)			

(10) ジルカロイ比熱

ジルカロイ比熱	MATPRO-Version 09	使用条件	ref.
$C_p = 245.11 + 0.15558T - 3.3414 \times 10^{-5} T^2$			8
C_p : 比熱 (J/kg · K)		常時	
T : 温度 (K) (300-1090K)			

(11) 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	8

(12) 被覆管腐食

被覆管の腐食速度を示す。

被覆管腐食速度	EPRI	使用条件	ref.
<ul style="list-style-type: none"> 被覆管腐食速度 : $dS/dt = (A/S^2) \exp(-Q_1/RT)$ 遷移後腐食速度 : $dS/dt = C \exp(-Q_2/RT)$, $C = C_0 + U(M\phi)^P$ 遷移の生じる酸化膜厚 : $D \exp(-Q_3/RT - ET)$ <p>dS/dt : 腐食速度 ($\mu m/day$)</p> <p>S : 酸化膜厚 (μm)</p> <p>T : 酸化膜と金属相の界面温度 (K)</p> <p>ϕ : 高速中性子束 ($n/cm^2 s$)</p> <p>R : 気体定数 ($1.987 cal/mol \cdot K$)</p> <p>$A = 6.3 \times 10^9 (\mu m^3/day)$ $Q_1 = 32289 (cal/mol)$</p> <p>$C_0 = 8.04 \times 10^4 (\mu m/day)$ $U = 2.59 \times 10^8 (\mu m/day)$</p> <p>$M = 7.46 \times 10^{-15} (cm^2 s/n)$ $P = 0.24$</p> <p>$Q_2 = 27354 (cal/mol)$ $D = 2.14 \times 10^7 (\mu m)$</p> <p>$Q_3 = 10763 (cal/mol)$ $E = 1.17 \times 10^{-2} (K^{-1})$</p>	ICOPRO=	35	1

2.4.3 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以下のとおりである。(MAPRO-Version 09)			
$K_{He} = 3.366 \times 10^{-3} T^{0.668}$ $K_{N_2} = 2.091 \times 10^{-3} T^{0.846}$ $K_{Kr} = 4.726 \times 10^{-5} T^{0.923}$ $K_{Xe} = 3.366 \times 10^{-5} T^{0.872}$		IGAPCN =0 (標準値)	7
K : 热伝導度 (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 ($W / m^2 \cdot K$) h_o : 非接触ギャップコンダクタンス ($W / m^2 \cdot K$) 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-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 δ : ペレット-被覆間表面の rms 粗さ (m) $\delta = 4.4 \times 10^{-6}$ Δr : 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-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		IGAPCN =1	8

$x > 600 \text{ MWd/t-U}$ の場合

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 Stoute.

$$h_{gap} = h_g + h_s$$

h_{gap} : ギャップコンダクタンス (W/cm · °C)

h_g : 非接触ギャップコンダクタンス (W/cm · °C)

h_s : 接触ギャップコンダクタンス (W/cm · °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 (W/cm · °C)

He : 0.0021, Ar : 0.00029, Kr : 0.0001

C : 接触圧に関する定数

$$C = 2.5 \quad \text{for } 100 \text{ kgf/cm}^2$$

$$C = 1.5 \quad \text{for } 500 \text{ kgf/cm}^2$$

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 : 10×10^{-4} , Ar : 5×10^{-4} , Kr : 1×10^{-4}

Xe : $< 1 \times 10^{-4}$ ($g_1 + g_2$ の値)

Δr : 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 (W/cm · °C)

$$\left. \begin{array}{l} K_1 = 0.038 \\ K_2 = 0.14 \end{array} \right\} K_m = 0.05977$$

7

IGAPCN

=2

P : 接触圧 (kgf/cm^2)
t : 被覆管厚さ (cm)
ID : 被覆管内径 (cm)
Y_s : 被覆管降伏応力 ($Y_s = 1,980 kgf/cm^2$)
a : 接触部の平均半径 (cm)
 $a_o = 0.5cm^{1/2}$
H : 軟らかい側のマイヤー硬度 (kg/cm^2)
h=3 · Y_s

ギャップコンダクタンス (4) Dean

$$h_{gap} = h_g + h_s$$

h_{gap} : ギャップコンダクタンス ($Btu/h \cdot ft^2 \cdot {}^\circ F$)

h_g : 非接触ギャップコンダクタンス ($Btu/h \cdot ft^2 \cdot {}^\circ F$)

h_s : 接触ギャップコンダクタンス ($Btu/h \cdot ft^2 \cdot {}^\circ F$)

$$h_s = 280 \cdot \frac{P}{M_2} \cdot \frac{K_1 \cdot K_2}{K_1 + K_2} \cdot \left(\frac{1}{\lambda_1 \cdot \lambda_2} \right)^{1/2}$$

P : 接触圧 (psi) ; P=267~675psi (18.6~45.7kgf/cm²)

M₂ : ジルカロイのマイヤー硬度 (psi)

$$M_2 = 120,000 \text{psi} (84.4 \text{kg/cm}^2)$$

K₁ および K₂ : ペレットおよび被覆管の熱伝導度

$$K_1 = 2.20 Btu/h \cdot ft \cdot {}^\circ F (0.038 W/cm \cdot {}^\circ C)$$

$$K_2 = 8.09 Btu/h \cdot ft \cdot {}^\circ F (0.14 W/cm \cdot {}^\circ C)$$

λ_1 および λ_2 : ペレットおよび被覆管の表面プロファイルの波長 (in)

$$\lambda_1 \cdot \lambda_2 \sim RUo_2$$

$$R_{zr} \text{ (粗さ)} = 50_{-5}^{+10} \times 10^{-6} rms (in)$$

$$h_g = \frac{K_g}{0.52 \cdot \delta}$$

K_g : ギャップガス熱伝導度 ($Btu/h \cdot ft \cdot {}^\circ F$)

Ar : 0.0168, He : 0.139, FP : 0.0088

δ : ペレット-被覆管ギャップ (ft) ; $\delta \sim Ruo_2$

modified Dean

$$h_s = 0.6P, \quad h_g = \frac{K_g}{\delta + 14.4 \times 10^{-6}}$$

IGAPCN = 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 (μm)	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。 $h_w = 0.1263 \cdot \exp\left(\frac{P_w}{6.201 \times 10^6}\right) q_s^{0.75}$ <p>h_w : 表面熱伝達係数 ($W / cm^2 \cdot K$) P_w : 冷却水圧力 (N / m^2) q_s : 被覆管外面熱流束 (W / cm^2)</p>	常時	5	
被覆管表面熱伝達 (2)	Dittus-Boelter		
サブクール状態の場合に使用する。 $h_w = 0.023 \frac{k}{De} \left(\frac{DeV\rho}{\mu} \right)^{0.2} \cdot (p_r)^{0.4}$ <p>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) ρ : 冷却水密度 (kg / m^3) μ : 冷却水の粘度 ($kg / m \cdot s$) p_r : プラントル数</p>	常時	4	

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.
$D = 7.6 \times 10^{-10} \exp(-7 \times 10^4 / RT) + S^2 jvV \div 2 \times 10^{-40} F \quad (m^2 / s)$ R : ガス定数=1.987(cal/mol/K) T : 温度 (K) S : 原子ジャンプ距離 = $\Omega^{\frac{2}{3}}$ Ω : 原子容積 = $4.09 \times 10^{-29} (m^3)$ $jv = 10^{13} \exp(-5.52 \times 10^4 / RT)$ $V = \frac{(\partial_s S^2 + ZV_o)}{2Z} \left[\left(1 + \frac{4K'Z}{jv(\partial_s S^2 + ZV_o)^2} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right]$ $\partial_s = 10^{15} \quad (m^{-2}, \text{シンク強度})$ $Z = 2 \quad (\text{欠損点数})$ $K' = 10^4 \quad (\text{原子当りの欠損率})$ $V_o = \exp(-5.52 \times 10^4 / RT)$ $F = 10^{19} \quad (fissions / m^3 \cdot sec, \text{核分裂速度})$	IGASP=0	12	

(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.
$D^{12} = \frac{3}{8} \left(\frac{\pi k T}{2m^*} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{n \pi d_{12}^2} \quad (m^2 / s)$ $m^* = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \quad (m : 1 \text{ 分子の重量})$ $d_{12} = \frac{1}{2} (d_1 + d_2) \quad (d : \text{分子の直径})$ $= 3.45 \times 10^{-10} \quad (m)$ $n = n_1 + n_2 \quad (\text{分子密度})$ $k \quad : \text{ボルツマン定数} \quad (= 1380 \times 10^{-16} erg / K)$ $T \quad : \text{温度 (K)}$	常時	14	

参考文献

- (1) Nakajima T., Ichikawa M., et al., FEMAXI-III : A Computer Code for the Analysis of Thermal and Mechanical Behavior of Fuel Rods, JAERI 1298 (1985)
- (2) Nakajima T., Saito H. and Ousaka T., Fuel Behavior Modelling Code FEMAXI-IV and Its Application, IAEA-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)
- (3) 電力中央研究所「バッテル高燃焼時諸効果研究計画、タスク3報告書」高燃焼時諸効果資料調査委員会報告 T90802 (1990年9月)
- (4) Dittus F.W. and Boelter L.M.K., Univ. Calif. Publ. Eng.2, 443 (1930)
- (5) Jens W.H. and Lottes P.A., Analysis of Heat Transfer, Burnout, Pressure Drop and Density Data for High Pressure Water, ANL-4627 (1951)
- (6) Robertson J.A.L., $\int k d\theta$ in Fuel Irradiation, CRFD-835 (1959)
- (7) Ross A.M. and Stoute R.L., Heat Transfer Coefficient between UO_2 and Zircaloy-2, CRFD-1075 (1962)
- (8) MATPRO-09, A Handbook of Materials Properties for Use in the Analysis of Light Water Reactor Fuel Rod Behavior, USNRC TREE NUREG-1005 (1976)
- (9) 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, 180 (1969)
- (10) White R.J. and Tucker M.O., A New Fission Gas Release Model, J. Nucl. Mater., 118 (1983) 1-38
- (11) Ham F.S., J. Phys. Chem. Solids 6, 335 (1958)
- (12) 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 (1982) 168-184
- (13) Ainscough J.B., Oldfield B.W., and Ware J.O., Isothermal Grain Growth Kinetics in Sintered UO_2 Pellets, ibid.49, 117-128 (1973/74)
- (14) Present R.D., Kinetic Theory of Gases, Mc-Graw Hill, N.Y. p.55 (1958)

- (15) Rashid Y.R., Tang H.R. and Johansson E.B., Mathematical Treatment of Hot Pressing of Reactor Fuel, Nucl. Eng. Des. 29, pp.1-6 (1974)
- (16) Washington A.B.G., Preferred Values for the Thermal Conductivity of Sintered Ceramic Fuel for Fast Reactor Use, UKAEA TRG 2236(D) (1973)
- (17) Ishimoto S., Hirai M., Ito K., Korey Y., J. Nucl. Sci. Technol., 31, 796-802 (1994)
- (18) Wiesenack W., et al., HWR-469 (1996)
- (19) Forsberg K., Lindstrom F. and Massih A.R., Modelling of Some High Burnup Phenomena in Nuclear Fuel, IAEA Technical Committee Meeting, England, Sept. 1994
- (20) 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)
- (21) Martin D.G., A Re-Appraisal of the Thermal Conductivity of UO_2 and Mixed(U,Pu) Oxide Fuels, J. Nucl. Mater., 110, pp.73-94 (1982)
- (22) Fukushima S., Ohmichi T., Maeda A., and Watanabe H., The Effect of Gadolinium Content on the Thermal Conductivity of Near-Stoichiometric $(\text{U},\text{Gd})\text{O}_2$ Solid Solutions, ibid. 105, pp.201-210 (1982)
- (23) Chubb W., Storhok V.W. and Keller D.L., Factors Affecting the Swelling of Nuclear Fuel at High Temperatures, Nucl. Technol. 18, pp.231-255 (1973)
- (24) Rolstad E. et al., Enlarged HPG Meeting, No.1/5/HPR-188 (1074)
- (25) USNRC, WASH-1236 (1972).
- (26) Marlowe M.O., Predicting In-Reactor Densification Behavior of UO_2 , Trans. ANS 17, 166 (1974)
- (27) 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, pp.497-502 (1976)
- (28) MacEwan J.R., Grain Growth in Sintered Uranium Dioxide:I, Equiaxed Grain Growth, J. Am. Cer. Soc. 45, 37 (1962)
- (29) Lyons M.F., Boyle R.F., Davis J.H., Hazel V.E., and Rowland T.C., Nucl. Eng. Design 21, 167 (1972)

- (30) Hagman D.L. and Reyman G.A., MATPRO-Version11, NUREG/CR-0497 (1979)
- (31) SCDAP/RELAP5/MOD2 Code Manual, Vol.4: MATPRO-A, A Library of Materials Properties for Light-Water-Reactor Accident Analysis, NUREG/CR-5273 (1990)
- (32) 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)
- (33) Pugh, Current Recommended Constitution Equations for Inelastic Analysis of FFTF Components, ORNL-TM-3602 (1972)
- (34) Hesketh R.V., Non-linear Growth in Zircaloy-4, J. Nucl. Mater. 30 (1969) 217-222
- (35) Gazarolli F., Garde A.M. et al., Waterside Corrosion of Zircaloy Fuel Rods, EPRI-NP 2789 (1982)
- (36) Kosaka Y., Thermal Conductivity Degradation Analysis of the Ultra High Burnup Experiment (IFA-562), HWR-341 (1993)

Appendix

A1 入力マニュアル

A2 プロッタ入力マニュアル

A3 (1)サブルーチンリスト

(2)サブルーチンツリー

A4 サンプル入出力

A.1 入力マニュアル

Card No.	SYMBOL	(FORMAT)
1	MTITL(I), I=1,20	(20A4) 任意のタイトル
2	¥INPUT ¥END	(2~80カラム) 任意のパラメータ 計算パラメータをName Listにて指定する。
3	NAX, IFEM1, IPLANT	(3I10) 燃料棒仕様 NAX = 軸方向セグメント数(1≤NAX≤12) IFEM1 = 第1着目セグメント番号(1≤IFEM1≤NAX) IPLANT = 1 …… Halden BWR の場合 = 2 …… その他の BWR の場合 = 3 …… PWR の場合
4	MRASA, CDIN, CDOUT	(I10, 2F10.0) 被覆管仕様 MRASA = 0 …… RA 材 = 1 …… SR 材 CDIN = 被覆管内径 (cm) CDOUT = " 外径 (cm)
5	NAX枚必要 (I = 1, NAX) IDISH(I), ICHAM(I), PDIN(I), PDIA(I), PLENG(I), ENR(I), FDENI(I), DZ(I)	(2I10, 6F10.0) ペレット仕様 ペレットの半径方向のメッシュ数は 10 に固定である IDISH(I) = 0 …… ディッシュなしペレット = 1 …… 片端面ディッシュ " " = 2 …… 両端面 " " ICHAM(I) = 0 …… チャンファなしペレット = 1 …… チャンファ ペレット PDIN (I) = ペレット中心孔直径 (cm) (注: ペレット半径方向 PDIA (I) = ペレット直径 (cm) メッシュ数は 10 に固定) PLENG(I) = 1 ペレット長さ (cm) ENR (I) = U-235 濃縮度 (-) FDENI(I) = ペレット理論密度比 (-) DZ (I) = ペレットスタック部のセグメントの軸方向長さ(cm)
6	IDISH = 1 or 2 の場合のみ入力 DISH, DEPTH, DISHB	(3F10.0) ディッシュ仕様 DISH = ディッシュ直径(cm), DEPTH = ディッシュ深さ(cm) DISHB = ディッシュ底直径(cm)
7	ICHAM = 1 の場合のみ入力 CHAMR, CHAMZ	(2F10.0) チャンファ仕様 CHAMR = チャンファ幅 (cm) CHAMZ = " 深さ(cm)
8	PLENUM(2), GPIN, (GMIXO(I), I=1,4) , PWEIT, PLENUM(1)	(8F10.0) プレナム仕様 PLENUM(2) = 上部 プレナム部容積 (cm ³) GPIN = 初期ガス圧力 (MPa) GMIXO(I) = 初期ガス組成 (-) i = 1 … He, i = 2 … N ₂ , i = 3 … Kr, i = 4 … Xe *N ₂ については、namelistで指定してAr等のガスに変更可能 PWEIT = ペレット総重量 (gram) PLENUM(1) = 下部 プレナム容積 (cm ³)

Card No.	SYMBOL	(FORMAT)	
9	NHIST	(I10)	履歴点数
	NHIST > 1 を入力 CARD10,11についてNHIST組入力する。		
10	A1, B1, A2, A5 A3, A4, IT, IP, IS, A6 A1 = 時間 (HOUR) B1 = 燃焼度 (MWD/TUO ₂ (IBUNP=0) MWD/TU (〃 =1) GJ/KGU (〃 =2) A2 = 線出力 (W/cm) A5 = 高速中性子束 (n/cm ² -s) A3 = 冷却材入口温度 (K) A4 = 冷却材圧力 (MPa) IT = 0 時間 (または燃焼度) は、IT=-100としたタイムステップからの 増分量 (ただし、IT=-100の指定がない場合は最初からの 経過時間(又は燃焼度)) = -100 前タイムステップからの時間増分 (又は燃焼度増分) = 100 IT=-100の指定を解除する。 (最初からの経過時間又は燃焼度 となる) IP = 0 出力しない履歴点 = 1 出力する履歴点 IS = 0 定常計算 = 1 ガス流動計算 = 2 非定常計算 A6 = 冷却材速度 (m/s) ただし、A1 (時間)、B1 (燃焼度) はどちらか一方を指定す る。両方指定するとB1 (燃焼度) の入力は無視される。 又、ISは通常は入力する必要はなく、プログラム中で自動設 定される。 (IAUTO=1)	(6F10, 3I5, F5.0)	履歴点データ
11	(RH(I), I=1, 12), II	(12F5.0,I5)	軸方向相対出力分布
	RH(I)=軸方向セグメントjの相対出力 (-) (NAX個のデータ) II = 同様の相対出力比を入力する履歴点数 なお、IIを2以上で指定した場合には、それ以降のII-1タイムステップ分 の入力についてはカード11は省略する。		
Card No.	SYMBOL	(FORMAT)	
12	BU, (RRH(I), I=1, 10)	(F10.0, 10F5.0)	径方向相対出力分布
	IFLX>0の場合のみ入力 BU = 燃焼度 (単位は 10 と同じ) RRH(I)=径方向方向セグメントIの相対出力 (-) NAMELISTで入力したIFLXの数だけ入力		
13	IEND	(A4)	入力終了カード
	“STOP” を入力する		

NAMELISTで指定する変数 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 ₂ , =1:MWd/tU, =2:GJ/kgU)	0
IDAY	入力時間の単位指定(=0:hr、=1:day)	0
IFLX	径方向出力分布の入力する燃焼度点数。 (=0 : Robertsonモデル)	0
IRH	軸方向出力分布の補間オプション (=0 : 省略した入力点は前段と同じ =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	1W/cm当りの高速中性子束(n/cm ² -s/W/cm) (履歴データで高速中性子束データを省略できる。)	0.0
計算オプション		
IFEMRD	=0 : 局所力学計算(詳細な力学計算 II), =1 : 燃料棒全長力学計算 (詳細な力学計算 I)	1
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	IFEMRD=0の場合、=0 : 通常計算, =1 : 弹性計算	0
IELAST	IFEMRD=1の場合、=0 : 通常計算, =1 : 弹性計算	0
MPP	FP放出計算オプション (=0 : 通常計算, =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 (実行時間がTLIM(sec)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	自動タイムステップ制御オプション (常時ガス流動計算は行ない、定常/非定常温度解析のタイムステップ幅はコードで自動制御する。IAUTO=0は入力制御)	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 ₂)	500
IPH	DPXX,DPBUの制御を指定セグメント(IFEM)とする場合はIPH=0, 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 $\Delta t = \frac{\bar{\sigma}}{E \cdot \dot{\varepsilon}_c} \cdot EFCOEF$ ここで、 $\bar{\sigma}$ (相当応力), E (ヤング率), $\dot{\varepsilon}_c$ (相当クリープひずみ速度)である。	10.0 (IFEMRD=0) 1.0 (IFEMRD=1)
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	変形計算の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 (=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 =1 : タイムステップコントロール有)	-1
FAC	タイムステップ幅調整因子	10 ⁴

NAMELISTで指定する変数 2

変数名	内 容	標準値
計算条件		
AY	ペレット上端面の傾き(Tilting), ディッシュペレットの場合はAY=0	0.002
TROOM	燃料棒各要素の初期温度 (K)	291.15
ITIME	プレナムガス圧を変更するオプション(履歴点番号を入れる)	3*0
GASPRN	ITIMEの履歴点でのプレナムガス圧(MPa)	3*0.0
PLENM	ITIMEの履歴点でのプレナム体積(cm ³)	3*0.0
GMIXN	ITIMEの履歴点でのガス組成(-) (1:He , 2:N ₂ , 3:Kr , 4:Xe)	12*0.0
GAPLK	軸力が発生する最小ギャップ幅	3.0
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 ⁻⁵
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 ⁻⁵
AMU	ペレット・被覆管摩擦係数	0.4
DE	冷却材流路の相当直径 (cm)	0.0
FAREA	冷却材流路断面積 (cm ²)	0.0
PITCH	燃料棒間のピッチ (cm)	1.3
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 (=1: MATPRO-09, =2: Washington, =3: Hirai, =4: Halden, =5: Modified Hirai(EXBURN), =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 ₂ 重量比(-)	0.0
Y	MO ₂ y 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 ₂ O ₃ 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 =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
クリープオプション		
FCRFAC	ペレットクリープ歪み速度に対する倍率 (変形モデル)	10.0
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
TFCRFC	ペレットクリープひずみ速度に対する倍率 (熱モデル)	10.
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) 1.3(SR材)	
TCCFRC	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 ² s)	10 ¹⁴

NAMELISTで指定する変数 3

変数名	内 容	標準値
IPUGH	被覆管クリープ計算で Pugh の反転を考慮する場合、IPUGH=1とする。	0
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。 IURS=0: $\varepsilon_R = \text{リロケーションひずみ}$ 、 IURS=1: $\varepsilon_R = \text{リロケーション } \varepsilon + \text{ガスバブルスウェーリング } \varepsilon + \text{クリープ } \varepsilon$	0
IYNG	ペレットクラックモデルオプション (=0: 剛性回復が2次関数、=1: 剛性回復が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)	2×10^9
EFAC	ペレットヤング率に対する倍率	1.0
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) 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) 焼きしまりの90%完了燃焼度 (MWd/tUO ₂)	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)	8×10^{-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 =0: Chubb, =1: Speight, =2: MATPRO-09, =3: Halden	0
STFCP	(IFSWEL=0の場合に使用する) 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) (変形モデル)	-3×10^7
SPCON	(IFSWEL=0の場合に使用する) 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)(熱モデル)	-10^6
FACP	(IFSWEL=1の場合に使用する) 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) ペレット粒界の1バブルあたりのFP原子数 (atoms/bubble)	5×10^8

NAMELISTで指定する変数 4

変数名	内 容	標準値
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 α	0.002
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 =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、 $K = \sigma_y + 33.44 \left(\frac{kg}{mm^2} \right)$ 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 =0: 考慮しない、=1: MATPRO-09, =2: Manzel =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) ヨールドワーク 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
FPガス放出モデル		
IGASP	FPガス放出率モデルオプション =0: 機構論的モデル, =1: 温度領域モデル	0
IGAS	(IGASP=1の場合に使用する) 温度領域モデルオプション =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) 粒内バルブ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): 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) 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) 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) 粒界バブルにかかる圧力Pextについてのオプション =0: Pext=0, =1: Pext=プレナム圧力, =2: Pext=接触圧力, =3: Pext=Max(プレナム圧, 接触圧), =10: Pext=熱応力, =11: Pext=熱応力(プレナム圧力を考慮), =12: Pext=熱応力(接触圧力を考慮), =13: Pext=熱応力(プレナム圧力+接触圧力を考慮), =14: Pext=力学解析(応力計算)で求めた平均応力 (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) 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) 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

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（続き）		
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) 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) 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) 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) 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) 境界層幅 (再溶解用メッシュ)(cm)	2×10^{-6}
HERLS	Heガス放出量の、FPガスの放出量に対する倍率	3.0
UO ₂ 粒成長オプション		
IGRAIN	UO ₂ 粒成長の物性式のオプション =0: 修正Ainscough, =1: Ainscough , =2: MacEwan , =3: Lyons , =4: MATPRO-09	0
GR	初期ペレット粒径 (μ m)	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) フィッティングパラメータ(粒成長抑制項)	1.0

NAMELISTで指定する変数 6

変数名	内 容	標準値
He放出オプション		
NTVHE	TVHEの指定した時刻点数	0
TVHE (13,50)	TVHE(1,n) : n番目の時刻点数(hr) TVHE(i+1,n) : n番目の時刻での軸方向iセグメントのHe生成量(mole)	650*0.
ガス流動モデルオプション		
IST	ガス流動オプション =0 : 瞬時完全混合モデル =1 : 軸方向ガス拡散モデル	1
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(cm)	0.001
THG1	軸方向FPガス流動モデルで用いる温度、容積等に対する補間パラメータ θ_1	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_2	1.0
AMLMX2	軸方向セグメント間の最大移行モル数(mol)	10^{-6}
AMLMX3	軸方向セグメント毎の最大FPガス放出量(mol)	2×10^{-6}
DTPR	1タイムステップ当りの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
被覆管腐食オプション		
ICORRO	被覆管外面腐食モデルオプション =0 : 考慮しない, =1 : EPRIモデル	0
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
RI	(IGAPCN=0,2の場合に用いる) ペレット表面の粗さ (μm)	1.0

NAMELISTで指定する変数 7

変数名	内 容	標準値
プロッター出力オプション		
IPRINT	出力オプション(=0:出力しない、=1:出力する) (1) インプットデータリスト (2) 燃料設計データ (3) 座標・メッシュ切りデータ (4) パラメータリスト (5) 履歴データ (6) タイムステップごとの熱的解析結果 (7) タイムステップごとの力学的解析結果 (8) セグメントごとの熱的解析結果のまとめ(熱モデル) (9) セグメントごとの力学的解析結果のまとめ(熱モデル) (10) セグメントごとのFPガス放出計算の結果のまとめ(熱モデル) (11) 燃料棒全体のFPガス放出計算の結果のまとめ(熱モデル) (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) (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) (14) 被覆管の応力とひずみのまとめ(力学的モデル) (15) 主要結果のまとめ(Final Information) (16) セグメントごとの熱的挙動のプロッター(ON-LINE)(Unit 14) (17) セグメントごとのFPガス挙動のプロッター(ON-LINE)(Unit 14) (18) 力学的挙動のプロッター(ON-LINE)(Unit 14) (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 (20) 未使用	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0
IWNOD	セグメント出力オプション(=0:出力しない、=1:出力する) IPRINT(8), IPRINT(9), IPRINT(10), IPRINT(16), IPRINT(17) において、 IWNOD(I)=1のセグメントIについて出力(プロッター出力を含む)され IWNOD(I)=0のセグメントIについては出力しない。 ただし、IWNODがすべて0の場合は、IFEM セグメントのみ IWNOD(IFEM)=1にセットされる。	12*0
IWTHE	熱的解析出力オプション(=0:出力しない、=1:出力する), (IPRINT(6)=1の場合のオプション) (1) 燃料温度 (2) ギャップガス (3) 粒半径 (4) 粒内ガスバブル半径 (5) 粒内ガスバブル密度 (6) 粒内ガス拡散係数 (7) 粒内ガス実効拡散係数 (8) 粒内ガス原子数 (9) 粒界ガス原子数 (10) 放出ガス原子数 (11) 粒内+粒界ガス原子数 (12) 粒内+粒界+放出ガス原子数 (13) 生成ガス原子数 (14) FPガス放出率 (15) 粒界ガス密度 (16) 粒界飽和ガス密度 (17) 粒界での平均応力 (18) 熱計算の条件 (19) 熱計算の従来の出力	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1

NAMELISTで指定する変数 8

変数名	内 容	標準値
IWFEM	力学的解析の出力オプション(IFEMRD=0のときのみ有効) (=0:出力しない,=1:出力する)、(IPRINT(7)=1の場合のオプション)	標準値
(1)	径方向応力	0
(2)	軸方向応力	1
(3)	円周方向応力	1
(4)	剪断応力	0
(5)	等価応力	1
(6)	降伏応力	0
(7)	径方向全ひずみ	0
(8)	軸方向全ひずみ	0
(9)	円周方向全ひずみ	0
(10)	剪断全ひずみ	0
(11)	等価塑性ひずみ	1
(12)	径方向クリープひずみ	0
(13)	軸方向クリープひずみ	0
(14)	円周方向クリープひずみ	1
(15)	剪断クリープひずみ	0
(16)	等価クリープひずみ	0
(17)	径方向弾性ひずみ	0
(18)	軸方向弾性ひずみ	0
(19)	円周方向弾性ひずみ	0
(20)	剪断弾性ひずみ	0
(21)	径方向熱ひずみ	0
(22)	軸方向熱ひずみ	0
(23)	やきしまりひずみ	0
(24)	スウェーリングひずみ	0
(25)	径方向剛性	0
(26)	軸方向剛性	0
(27)	円周方向剛性	0
(28)	径方向クリープ速度	0
(29)	軸方向クリープ速度	0
(30)	円周方向クリープ速度	0
(31)	剪断方向クリープ速度	0
(32)	等価クリープ速度	0
(33)	径方向全ひずみ速度	0
(34)	軸方向全ひずみ速度	0
(35)	円周方向全ひずみ速度	0
(36)	剪断方向全ひずみ速度	0
(37)	等価全ひずみ速度	0
(38)	ひずみエネルギー	0
(39)	径方向温度分布	1
(40)	ペレット／被覆管の相互作用	1
(41)	ペレット／ペレットの相互作用	1
(42)	節点の変位	1
(43)	PCMIのプロット	1
(44)	クラック・降伏マップ	1

(45)	力学的計算の条件	1
IWROD	力学的解析出力オプション(=0:出力しない,=1:出力する) (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	FEMAXI-IV プロッターテープの作成 (力学モデル) (Unit 1)	0
IPLOPT	=0:入力した経歴点のみ書き出す =1:計算したタイムステップ全点について書き出す =-n:計算したタイムステップをn点おきに書き出す (ただし、入力した経歴点は必ず書き出す) <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($n/cm^2 \cdot sec$)、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/sec)について入力を行なう。ただし、A1(時間)が決まればB1(燃焼度)が決まり、B1が決まればA1が決まるので、A1、B1についてはどちらか一方の入力でよい。また、B1については、単位系の指定をNAMELIST中のIBUNPで行なう。IBUNP=0ならばB1はMWd/t-UO₂、IBUNP=1ならばMWd/t-U、IBUNP=2ならばB1はGJ/kg-Uである。

IT(入力ジェネレーター)を用いて、増分形での指定が出来る。ITは、0, 100, -100の入力選択ができる。IT=0を指定すると、A1(又はB1)は前段の履歴点からの時間増分(又は燃焼度増分)として扱かわれ、IT=100を指定すると、A1(又はB1)は最初の履歴点からの時間(燃焼度)

として扱う。IPは出力オプションで、IP ≥ 1 は詳細出力を行なう履歴点、IP=0は簡易出力のみの履歴点である。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、この切り替えはコード中で自動的に行われるため、入力の必要はない。

--FORMAT (6F 10.0, 2I5)

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は相対出力分布で、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中央位置での出力比を与える。したがって入力はNAX（軸方向セグメント数）個必要であり、最大12である。又、履歴点で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、入力の省略が出来る。

--FORMAT (12F5.0, I5)

12F 5.0	I 5
(RH(I), I=1, 12)	I I

ただし、RHはNAX（セグメント数）個のデータをセットすればよい。

入力方法

出力履歴の入力は、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う。

入力例(1)

500W/cmまで10時間で出力を上昇する場合の軸方向1セグメントでの入力例である。ただし、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/sec)とした。

```
....5....0....5....0....5....0....5....0....5....0....5....0....5....0....5....0
      2
      1.0          10.0        500.0    2.5E13      513.15      3.4       2       1       3.0
....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での状態を設定する。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 2×10^1 (n/cm²·sec)にセットされるので入力の必要はない。

3行目は、相対出力分布の入力で、軸方向1セグメントの計算であるから、RH(1)=1.0とした。履歴点オプションII=2となっているので、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。

4行目は、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 = 2.5×10^{13} (n/cm²·sec)が入力されており、タイムステップは自動分割され、その分割点では、時間依存の変数の値は線形補間により求められる。冷却材温度と冷却材圧力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と入力したのと同等である。

出力オプションは、2行目も3行目もIP=1が入力されているから、hot stand-byの状態においても500W/cm到達時のいずれにおいても、詳細出力が行われる。

入力例(2)

200W/cmで20GWd/tUO₂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} (n/cm²·sec)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/sec)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のそれぞれに対して与える。ベース照射中では、5GWd/t-UO₂、10GWd/t-UO₂、15GWd/t-UO₂、20GWd/t-UO₂で出力が行われ、ランプ照射中では、250W/cm以上について、50W/cmごとに出力される。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が行なわれる。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
1.0          0.001    2.0E09           -100     1
1.0          0.001    2.0E09           -100
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           -100
72.0         250.0     5.0E13           -100     1
0.25
0.5
0.75
1.0
1.25        500.0     1.0E14           -100     1
1.0
3.0
6.0
12.0
24.0         500.0     1.0E14           -100     1
2.5          0.001    2.0E09           -100     1
STOP
....5....0....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、すべて簡易出力が得られる。その中で詳細出力のほしい履歴点のみIP ≥ 1 とした。ここで、IP=2と指定し、その履歴点以降について出力情報が得られる（出力編参照）。燃焼度の単位系はMWd/tUO₂とするので、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している。

4行目は2番目の履歴データでA1=1(HR), A2=200(W/cm), $A5 = 4 \times 10^{13} (n / cm^2 \cdot sec)$, 冷却材温度、圧力は同条件である。

5~8行目は、200(W/cm)で燃焼度を20 GWd/tUO₂まで進めた入力で、5 GWd/tUO₂, 15 GWd/tUO₂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), $A5 = 4 \times 10^{13} (n / cm^2 \cdot sec)$ 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/tUO₂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している。なお出力0は許されないので 10^{-3} (W/cm)程度の値を指定しなければならない。

12行目は12.5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50W/cmの出力上昇(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。又、線出力は、線形補間されるから14~17行目に、A2=300,350,400,450の値を指定したのと同等である。高速中性子束も同様で、 $A5 = 6 \times 10^{13}, 7 \times 10^{13}, 8 \times 10^{13}, 9 \times 10^{13}$ を指定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している。なお、冷却材温度、圧力の条件は一定としたのとで第2履歴点以降の入力は省略した。又、線出力、高速中性子束は線形補間されるので、最終履歴点に出力がないと入力エラーとなる。(ともに0は許されない)。

A.2 プロッタ入力マニュアル

Card No.	SYMBOL	(FORMAT)
1	コメント	
2	ISET	(*) 図の総数

以下のカードをISET組入力する

3	IRNUM, ITOPT, ISYM IRNUM;1図に描く線の本数 (最大5本)	(*) 機能の設定
	ITOPT;グラフの種類の指定 ITOPT=0 X軸を時間、燃焼度、線出力とする。 ITOPT=1 X軸を径、または軸方向座標とする。 ITOPT=2 実測値との比較図を作成する。 (この場合は実測値が線を1本使うので、 IRUMは最大4本となる。) ISYM ;センターシンボルのオプション =0 センターシンボルをプロットしない =1 センターシンボルをプロットする	
4	IXOPT, IXOPT2, IYNUM, (IYOPT(I), I=1, IYNUM) (*)	軸の設定
	IXOPT; X軸の内容を指定する。 (ITOPT=0 or 2の場合に指定する) =1 時間 =2 径方向座標 (-); ITOPT=1 の場合に指定する。 =3 軸方向座標 (-); ITOPT=1 の場合に指定する。 =4 燃焼度 (着目セグメント) =5 線出力 (着目セグメント, W/cm) =6 燃焼度 (全セグメント平均) =7 線出力 (全セグメント平均, W/cm) IXOPT2; 時間、燃焼度の単位を指定する。 ・X軸を時間 (IXOPT=1) とした場合の単位指定 IXOPT2 =0 Hour IXOPT2 =1 Day ・X軸を燃焼度(IXOPT=4 or 6)とした場合の単位指定 IXOPT2 =0 MWd / tUO ₂ IXOPT2 =1 GWd / tUO ₂ IXOPT2 =2 MWd / tU IXOPT2 =3 GWd / tU IYNUM;Y軸の数。Y軸を2種類以上 (=2種類以上の物理量、IYNUM≥2) とした場合は、各軸ごとに1本づつグラフを描くことになるため、IYNUM=IRNUM とする。 (IYOPT(I), I=1, IYNUM); Y軸の内容を表(1)~(3)から選択して、番号を入力する。	
5	(IR(I), I=1, IRNUM) (*)	径方向メッシュ番号
	(IR(I), I=1, IRNUM)	図ごとに径方向メッシュ番号を指定する 指定する必要がない場合は1を入力する

Card No.	SYMBOL	(FORMAT)
6	(IZ(I), I=1, IRNUM)	(*) 軸方向メッシュ番号
	(IZ(I), I=1, IRNUM) 図ごとに軸方向メッシュ番号を指定する 指定する必要がない場合は1を入力する	
7	(ITIM(I), I=1, 2) or (ITIM(I), I=1, IRNUM) (*) タイムステップ番号 (ITOPT=0 または2の場合は(ITIM(I), I=1, 2)で入力する) ITIM(1)= 図の始点のタイムステップ番号を指定する ITIM(2)= 図の終点のタイムステップ番号を指定する (ITOPT=1の場合は、(ITIM(I), I=1, RNUM)で入力する) 図ごとにタイムステップ番号を指定する。	
8	X0, XM, XNUM, IXN, IFLAG	(*) X軸目盛の設定 IXOPT= 2, 3のときはダミー X0 ; X軸目盛りの最小値 (IFLAG≠3) XM ; X軸目盛りの最大値 (IFLAG≠3) XNUM ; X軸目盛りの間隔 (IFLAG≠3) IXN ; X軸目盛りの小数点以下の桁数 (IFLAG≠3) (例) 10 のとき IXN=-1 10.0 のとき IXN= 1 10.00 のとき IXN= 2 IFLAG ≠3 : X軸目盛りに自動スケールを適用しない。 =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) Y0(I), YM(I), YNUM(I), IYN(I), IFLAG(I)	(*) Y軸目盛の設定 Y0(I) ; Y軸目盛りの最小値 (IFLAG(I)≠3) YM(I) ; Y軸目盛りの最大値 (IFLAG(I)≠3) YNUM(I); Y軸目盛りの間隔 (IFLAG(I)≠3) IYN(I) ; Y軸目盛りの小数点以下の桁数 (IFLAG(I)≠3) (IXNと同様に入力) IFLAG(I):Y軸目盛りのオプション =0 目盛りを実数タイプで描く (小数表示) =1 目盛りEタイプで描く (指数表示) =2 Y軸目盛りを対数とする =3 Y軸目盛りに自動スケールを適用する [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)

(**) : IXOPT2によって指定される。

群	NO	項目	単位
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	(%)
	6	被覆管伸び	(%)
	7	被覆管最大外径変化	(μm)
	8	軸方向平均線出力	(w/cm)
	9	平均Iodine濃度	(/cm ²)
	10	最大Iodine濃度	(/cm ²)
	67	被覆管平均外径変化	(μm)

Y軸の内容(2)

(**) : IXOPT2によって指定される。

群	NO	項目	単位
時間・燃焼度と軸方向座標に対するデータ	11	線出力	(W/cm)
	12	燃焼度	(**)
	13	全ギャップ幅 (直径)	(μm)
	14	PCM I圧力	(MPa)
	15	FPガス放出率	(%)
	16	ペレット-被覆管摩擦力	(MPa)
	17	ペレット伸び	(%)
	18	被覆管伸び	(%)
	19	ギャップコンダクタンス	(W/cm ² C)
	20	冷却材温度	(°C)
	21	被覆管内面温度	(°C)
	22	被覆管外面温度	(°C)
	23	ペレット中心温度	(°C)
	24	ペレット外面温度	(°C)
	25	被覆管外径変化	(μm)
	26	Xe + Kr組成	(%)
	68	ペレット密度	(T·D)

Y軸の内容(3)

(**) : IXOPT2によって指定される。

群	NO	項目	単位
C	27	ペレット相当応力	(MPa)
時	28	ペレット平均応力	(MPa)
間	29	ペレット径方向応力	(MPa)
・	30	ペレット周方向応力	(MPa)
燃	31	ペレット軸方向応力	(MPa)
燒	32	ペレット径方向弾性ひずみ	(0.01%)
度	33	ペレット周方向弾性ひずみ	(0.01%)
と	34	ペレット軸方向弾性ひずみ	(0.01%)
軸	35	ペレット相当クリープひずみ	(0.01%)
方	36	ペレット径方向クリープひずみ	(0.01%)
向	37	ペレット周方向クリープひずみ	(0.01%)
座	38	ペレット軸方向クリープひずみ	(0.01%)
標	39	ペレット相当塑性ひずみ	(0.01%)
及	40	ペレット径方向ひずみ	(0.01%)
び	41	ペレット周方向ひずみ	(0.01%)
径	42	ペレット軸方向ひずみ	(0.01%)
方	43	ペレット径方向熱膨張ひずみ	(0.01%)
向	44	ペレット軸方向熱膨張ひずみ	(0.01%)
座	45	ペレットスウェーリングひずみ($\Delta L/L$)	(0.01%)
標	46	ペレット要素温度	(°C)
に	47	ペレットFPガス放出率	(%)
対	48	被覆管相当応力	(MPa)
す	49	被覆管平均応力	(MPa)
る	50	被覆管径方向応力	(MPa)
デ	51	被覆管周方向応力	(MPa)
ー	52	被覆管軸方向応力	(MPa)
タ	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%)

A. 3 (1) サブルーチンリスト

表A1に、FEMAXI-IV 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 A1 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 A1 FEMAXI-IV サブルーチンリスト

サブルーチン名	内 容	主	熱	力 学	
				全 体	局 所
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		○		
BDMAT	[B] ^T [D]マトリクスの作成				○
BLOCKDAT _A	ブロックデータリスト	○			
BMAT	[B]マトリクスの作成				○
BOUNDF	ペレット上面軸方向節点力の計算				○
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	○	○	○	
CELMOD	被覆管ヤング率	○	○	○	
CFRFZ	被覆管軸力の計算				○
CHCAP	被覆管定容比熱	○			
CHSOFT	被覆管降伏関数の応力微分項の計算			○	○
CLBDF	ペレット上面接触力				○
CLEAR	実数領域のゼロセット	○			

表 A1 (続き)

サブルーチン名	内 容	主	熱	力 学	
				全体	局所
CMAT	ペレット、被覆管の実効ヤング率、ポアソン比の計算				○
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			○	
COLECT	全体剛性マトリクス、加重ベクトルの計算				○
COORDI	局所モデルの有限要素法による形状座標のセット				○
CPOIR	被覆管ポアソン比		○	○	○
CPUGH	PUGH の反転のコントロールルーチン				○
CRACK	ペレットクラック状態セット				○
CREEP1	被覆管クリープの[C]マトリクス{△ε°}ベクトル作成				○
CREEP2	被覆管クリープひずみ増分{△ε°}の作成				○
CRPEP2	被覆管クリープひずみ速度 1/ε° の作成(MATPRO-9)				○
CRPEP3	被覆管クリープひずみ速度 1/ε° の作成(燃安専)				○
CRPEQ2	被覆管クリープの $\frac{1}{\epsilon^c} (= f), \frac{\partial f}{\partial \sigma}, \frac{\partial f}{\partial \epsilon^H}$ の作成(MATPRO-9)				○
CRPEQ3	被覆管クリープの $\frac{1}{\epsilon^c} (= f), \frac{\partial f}{\partial \sigma}, \frac{\partial f}{\partial \epsilon^H}$ の作成(燃安専)				○
CRPHD2	被覆管クリープの $\frac{1}{\epsilon^H} (= g), \frac{\partial g}{\partial \sigma}, \frac{\partial g}{\partial \epsilon^c}$ の作成(MATPRO-9)				○
CRPHD3	被覆管クリープの $\frac{1}{\epsilon^H} (= g), \frac{\partial g}{\partial \sigma}, \frac{\partial g}{\partial \epsilon^c}$ の作成(燃安専)				○
CRPM11	ペレットクリープの[C]マトリクス{△ε°}ベクトル作成				○
CRPM12	ペレットクリープひずみ増分{△ε°}の作成				○
CTHCON	被覆管熱伝導率		○		
CTSOFT	被覆管降伏関数の温度微分項の計算			○	○
CUBIC	3次方程式の最大実数解の算出 (バブル径の計算)		○		
CYIE	ジルカロイ降伏応力 (0.2%耐力)			○	○
CYIE2	ジルカロイ降伏応力 (ϵ^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)		○		

表 A1 (続き)

サブルーチン名	内 容	主	熱	力 学	
				全体	局所
DELTAN	局所解析での有限要素法によるメッシュ切り要素データ				○
DENSF	ペレットやきしまりモデル		○		○
DEVSIG	偏差応力				○
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			○	○
DPMAT	[D ^p]マトリクスの作成				○
DPST	$\Delta\bar{\epsilon}_p$ の計算				○
ELMLP1	要素剛性マトリクス、加重ベクトルの作成コントロール				○
ELMLP2	要素の応力、ひずみの計算コントロール				○
EQIEPS	相当ひずみの計算				○
EQISIG	相当応力の計算				○
EQSCAL	ϵ^p における降伏曲面の大きさの収束計算			○	○
ESMAT	要素剛性マトリクスの作成				○
FCREEP	ペレットクリープひずみの計算(MATPRO-09)		○		
FDIST	ペレット径方向フラックスデプレッションの計算		○		
FDISTF	ペレット径方向フラックスデプレッションの計算		○		
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		○		

表 A1 (続き)

サブルーチン名	内 容	主	熱	力 学	
				全体	局所
FHSOFT	ペレット降伏関数 σ_y 応力微分項の計算				○
FISGAS	FP ガス放出率を温度領域毎に決定するテーブル		○		
FISRAT	核分裂密度の計算	○			
FLMCON	被覆管表面熱伝達係数 (Jeas-Lottes の式)		○		
FLOAD	要素荷重ベクトルの計算				○
FLXDEP	ペレット径方向フラックスデプレッションの計算	○			
FORCE	全体外力ベクトルの計算				○
FPOIR	ペレットポアソン比			○	○
FPRES2	表面節点の有効幅の計算				○
FTSOFT	ペレット降伏関数 σ_y 温度微分項の計算				○
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	○			
GAPELN	ペレット／被覆管、ペレット／ペレット接触判定				○
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			○	
GAULP1	要素ガウス点での剛性マトリクス、荷重ベクトル作成				○
GAULP2	要素ガウス点での応力・ひずみ計算				○
GDTHCN	ガドリニアの熱伝達率	○			
GPSSET	境界条件の設定				○
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 A1 (続き)

サブルーチン名	内 容	主	熱	力 学	
				全 体	局 所
GTHCON	ガスの熱伝導率		○		
HEAD2	熱料棒全長解析用のタイトル	○			
HEADER	局所解析用のタイトル	○			
HEATG	ZrO ₂ 熱伝導度		○		
HOTVOL	プレナム容積計算の補助ルーチン		○		
HTX	被覆管表面熱伝達係数(Jens-Lottes)		○		
ICLEAR	整数領域のゼロセット	○			
INIGAS	Hot stand-by でのプレナム圧力、容積計算		○		
INIMAT	[C]マトリクスの計算				○
INISTR	初期ひずみの計算				○
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	○			
INPR	局所モデルの径方向メッシュ切り				○
INPUT1	熱計算のための入力ルーチン	○			
INPZ	局所モデルの軸方向メッシュ切り				○
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			○	
INVERS	4×4 対称マトリクスの逆行列				○
JACK2	2 次要素のヤコビアン				○
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	○			
LINSET	局所モデルの外面の節点配列の設定				○

表 A1 (続き)

サブルーチン名	内 容	主	熱	力 学	
				全 体	局 所
LOCALI	ガウス点情報の格納・取り出し				○
LSYM	シンボルの印刷(ON-LINE プロッター)	○			
MAIN	主ルーチン	○			
MATDAT	伝熱計算のための物性値セット		○		
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			○	
MODIFY	局所モデルの接触境界条件の設定				○
MODSET	局所モデルの全体マトリクス領域計算				○
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)			○	
NCOUPL	接触対の初期セット(局所モデル)				○
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			○	
OURELM	要素ガウス点情報(応力・ひずみ)の出力				○
OUREM	要素ガウス点情報(応力・ひずみ)の出力補助ルーチン				○
OUTND	節点変位の出力補助ルーチン				○
OUTND	節点変位の出力				○
OUTP	全体モデルの出力(時間依存)			○	
OUTP1	局所モデルの出力(時間依存)				○
OUTPT0	最終のサマリー出力			○	
OUTPT1	最終のサマリー出力			○	○
OUTPT2	最終のサマリー出力			○	○
P2	2次要素の形状関数				○
PAPLOT	クラック、降伏マップ				○
PDENS	ペレットやきしまりひずみ			○	○

表 A1 (続き)

サブルーチン名	内 容	主	熱	力 学	
				全 体	局 所
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		○		○
PLOTLN	ギャップ接触状態マップ				○
POWDIS	出力分布の計算		○		
PPLOT	ギャップ接触状態マップ補助ルーチン				○
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		○		
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)		○		
PRIOPT	オプション出力(局所モデル用)	○			
PROPT2	オプション出力(全体モデル用)	○			
PROBD1	ペレット軸力条件設定				○
PROBDF	ペレット/ペレット接触判定				○
PROBTY	降伏除荷判定				○
PROFIL	プロファイル法によるアドレス計算				○
PSWEL	ペレットスウェリングひずみ				○
PSWELT	ペレット固体スウェリングひずみ		○	○	○
PTHCON	ペレット熱伝導率	○			
PTHEX	ペレット熱膨張		○	○	○
PUGH	被覆管クリープ PUGH の反転計算				○
PUTHCN	ペレット熱伝導率		○		

表 A1 (続き)

サブルーチン名	内 容	主	熱 力 学	
			全体	局所
PX2	有限要素法 2 次要素の $\frac{\partial N}{\partial \xi}$			○
PY2	有限要素法 2 次要素の $\frac{\partial N}{\partial \eta}$			○
RDGAS1	軸方向移流ガス計算タイムステップ幅の設定	○		
RDGAS2	軸方向移流拡散モデル	○		
RDTEMP	熱計算全体のコントロール	○		
REDSTR	粒成長後のペレット粒内での FP 密度分布の再配分	○		
REPLG	ガウス点情報（応力、ひずみ）の更新			○
REPLN	節点情報（変位節点力）の更新			○
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）			○
SETPL1	クラック・弾塑性マップの作成			○
SETPL2	クラック・弾塑性マップの作成			○
SETPL3	クラック・弾塑性マップの作成			○
SETPLT	クラック・弾塑性マップの作成			○
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	○		
SHAPE2	2 次の形状関数			○
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			○

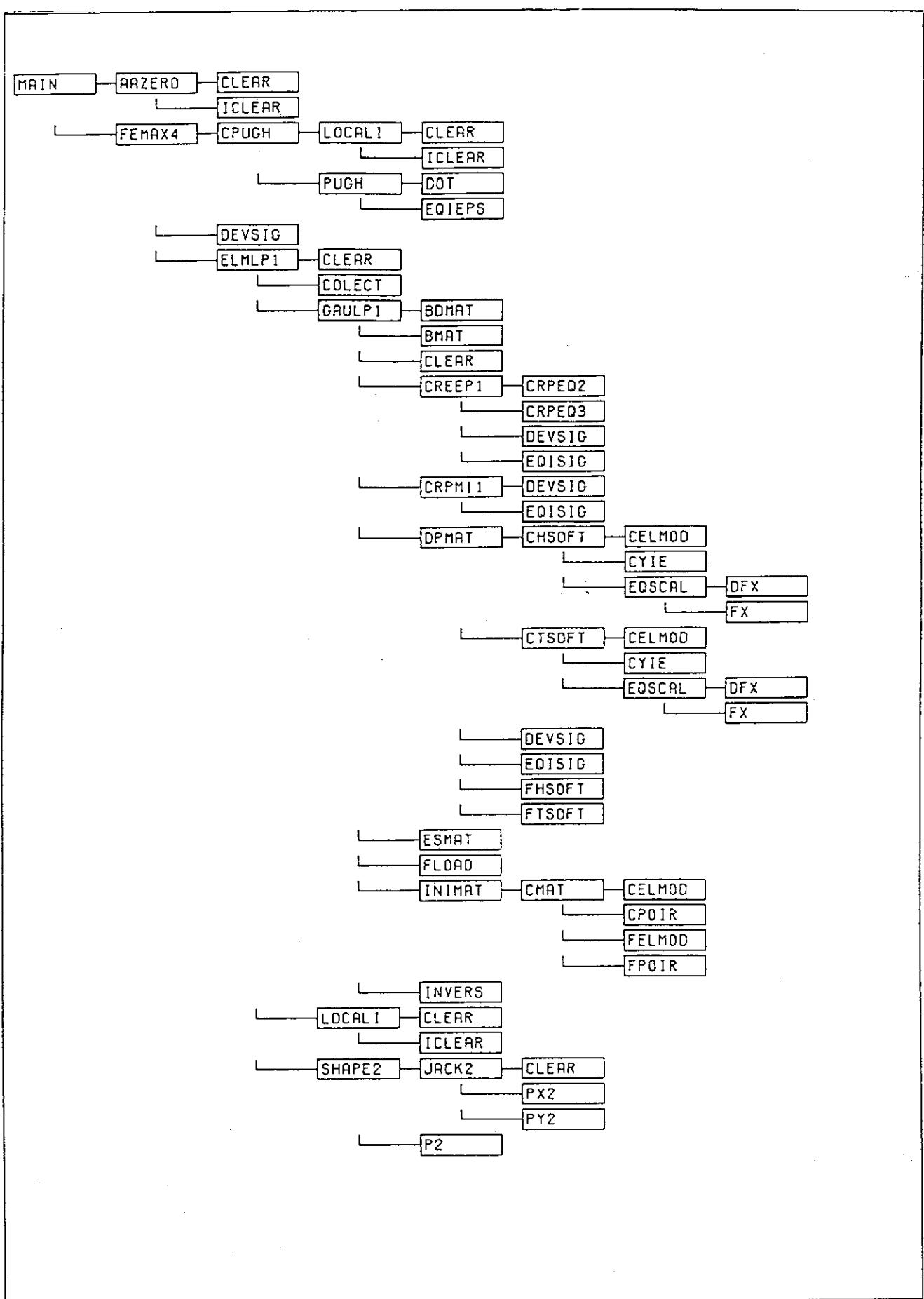
表 A1 (続き)

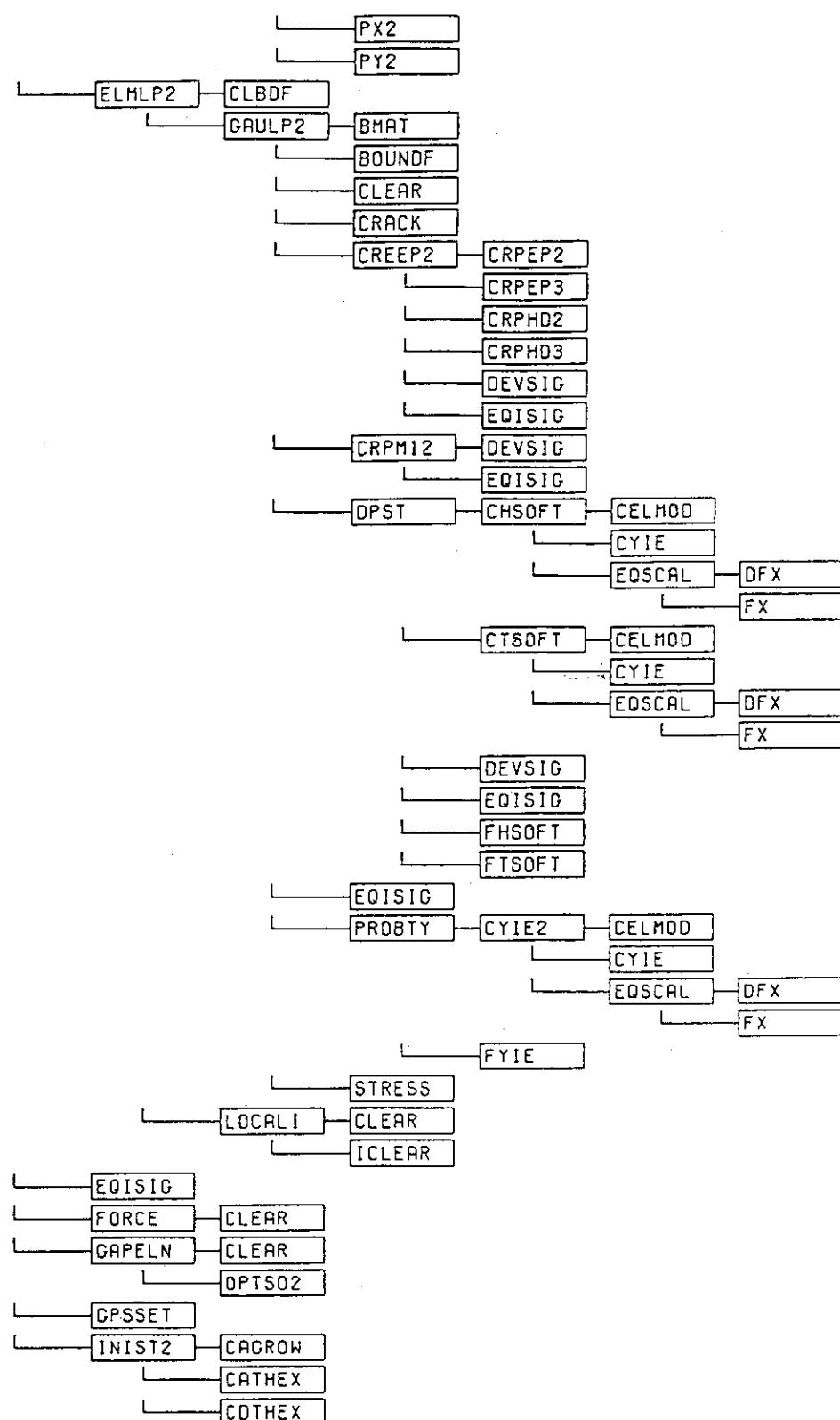
サブルーチン名	内 容	主	熱	力 学	
				全 体	局 所
SSMAT	セグメント毎の全体マトリクスの作成			○	
STRESS	応力・ひずみ計算				○
SUFCN	被覆管表面熱伝達係数のコントロール		○		
SWELL	FP 放出モデルと関連付けしたペレットスウェリングモデル		○	○	○
TEMP1D	一次元熱伝導計算		○		
TERP	ON-LINE PLOTTER 用計算ルーチン		○		
THERFD	ガススウェリングによるギャップの閉塞		○		
THGAPN	熱計算での変形計算		○		
TIC	ON-LINE プロッター補助ルーチン	○			
TIMEB	軸方向(P/P)接触によるタイムステップコントロール				○
TIMEG	径方向(P/C)接触によるタイムステップコントロール				○
TIMER	タイムステップコントロール主ルーチン				○
TIMEY	塑性／除荷によるタイムステップコントロール				○
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 (BMI モデル)		○	○	○
USMESH	伝熱計算用メッシュ切り		○		
USTEMP	伝熱計算主ルーチン		○		
VLUMES	プレナム容積計算		○		
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 $\dot{\epsilon}^c$ の作成			○	

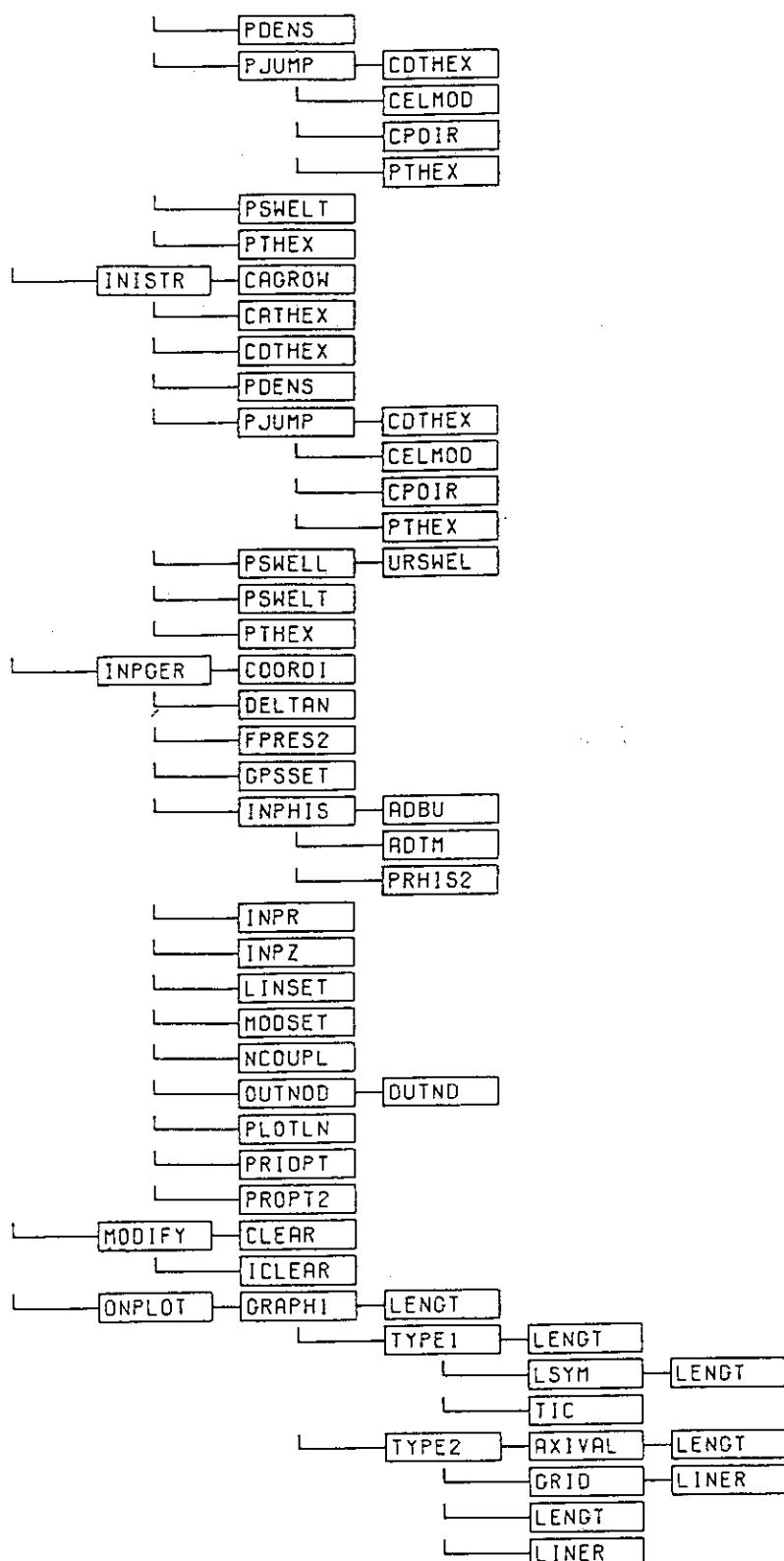
表 A1 (続き)

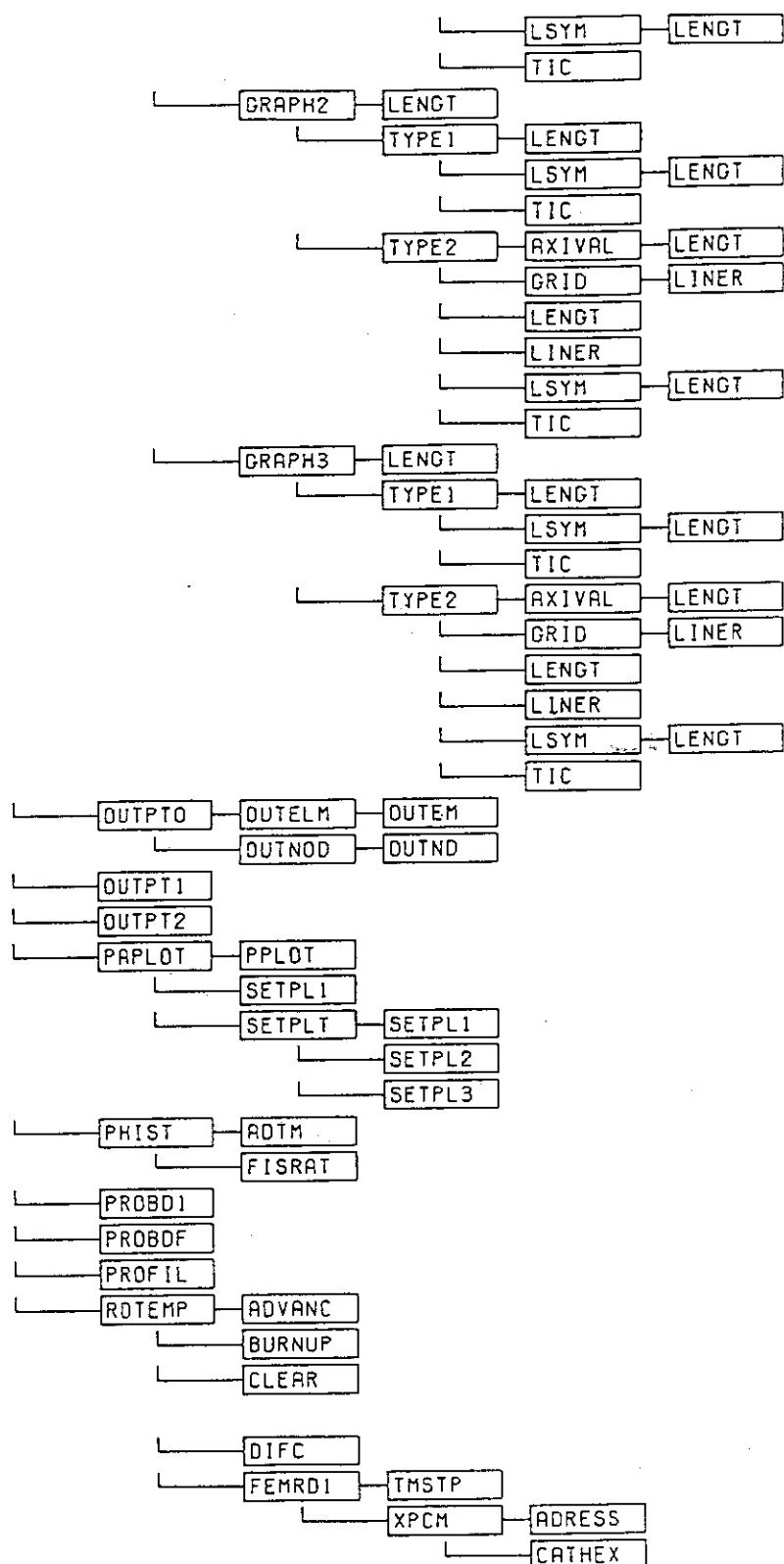
サブルーチン名	内 容	主	熱	力 学	
				全 体	局 所
XCPEQ2	被覆管クリープの $\bar{\epsilon}^c (= f)$, $\frac{\partial f}{\partial \sigma}, \frac{\partial f}{\partial \epsilon^c}$ の作成			○	
XCPHD2	被覆管クリープ $\bar{\epsilon}^H (= g)$, $\frac{\partial g}{\partial \sigma}, \frac{\partial g}{\partial \epsilon^H}$ の作成			○	
XCPM11	ペレットクリープの $[C^c]$ マトリクス, $\{\Delta \epsilon^c\}$ ベクトル作成			○	
XCPM12	ペレットクリープのひずみ増分 $\{\Delta \epsilon^c\}$ の作成			○	
XCREP1	被覆管クリープの $[C^c]$ マトリクス, $\{\Delta \epsilon^c\}$ ベクトル作成			○	
XCREP2	被覆管クリープのひずみ増分 $\{\Delta \epsilon^c\}$ 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 P u g h の反転			○	

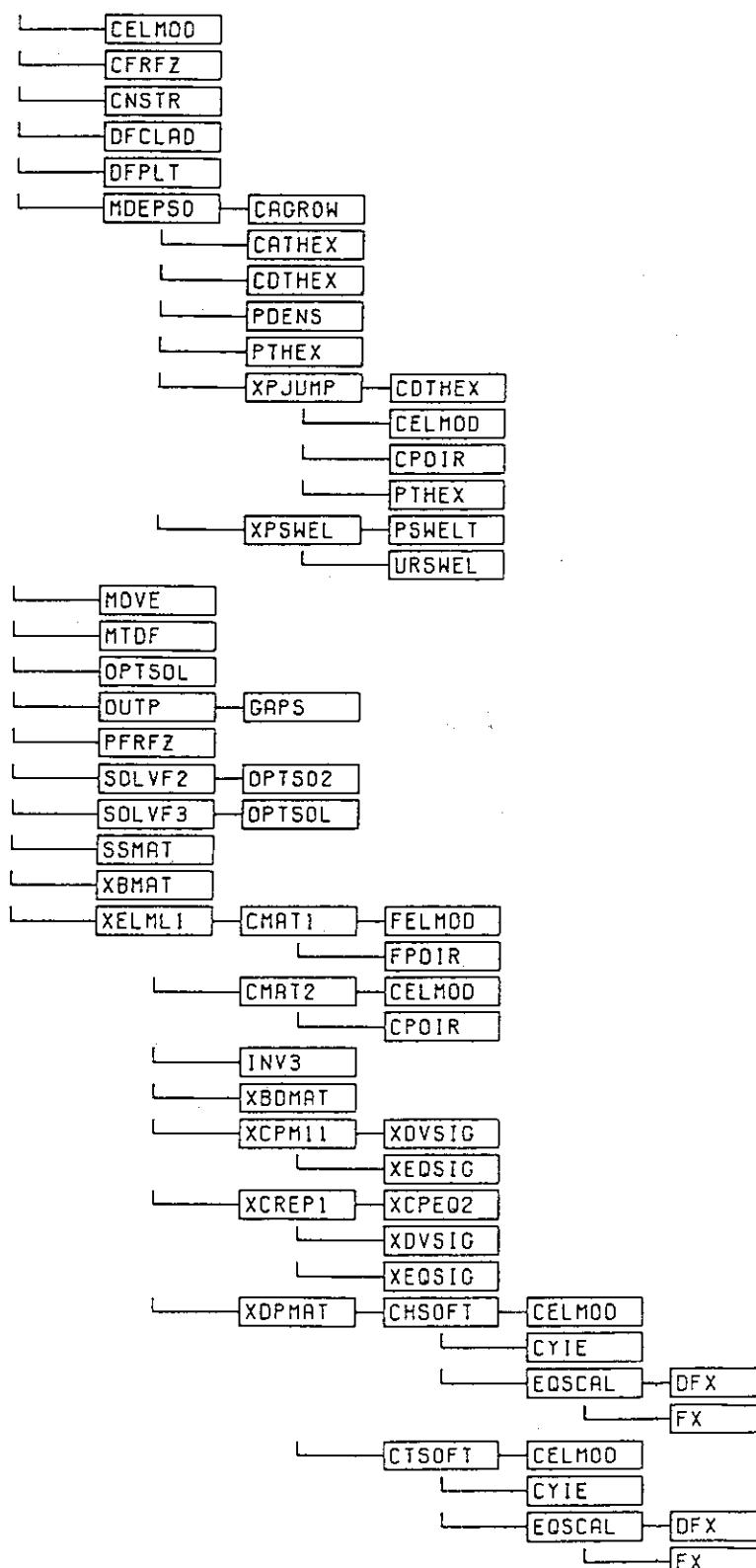
A3-(2) サブルーチンツリー

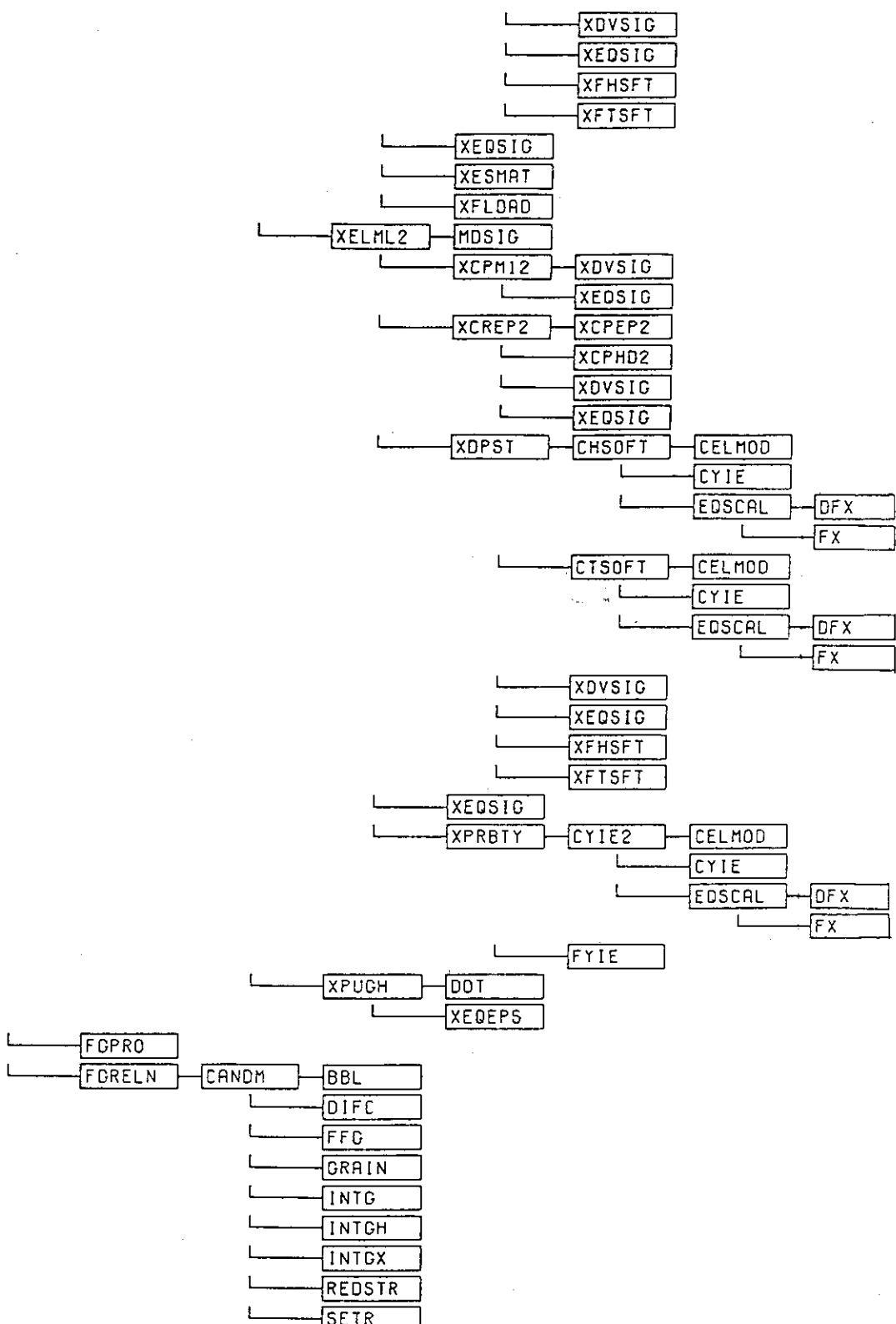


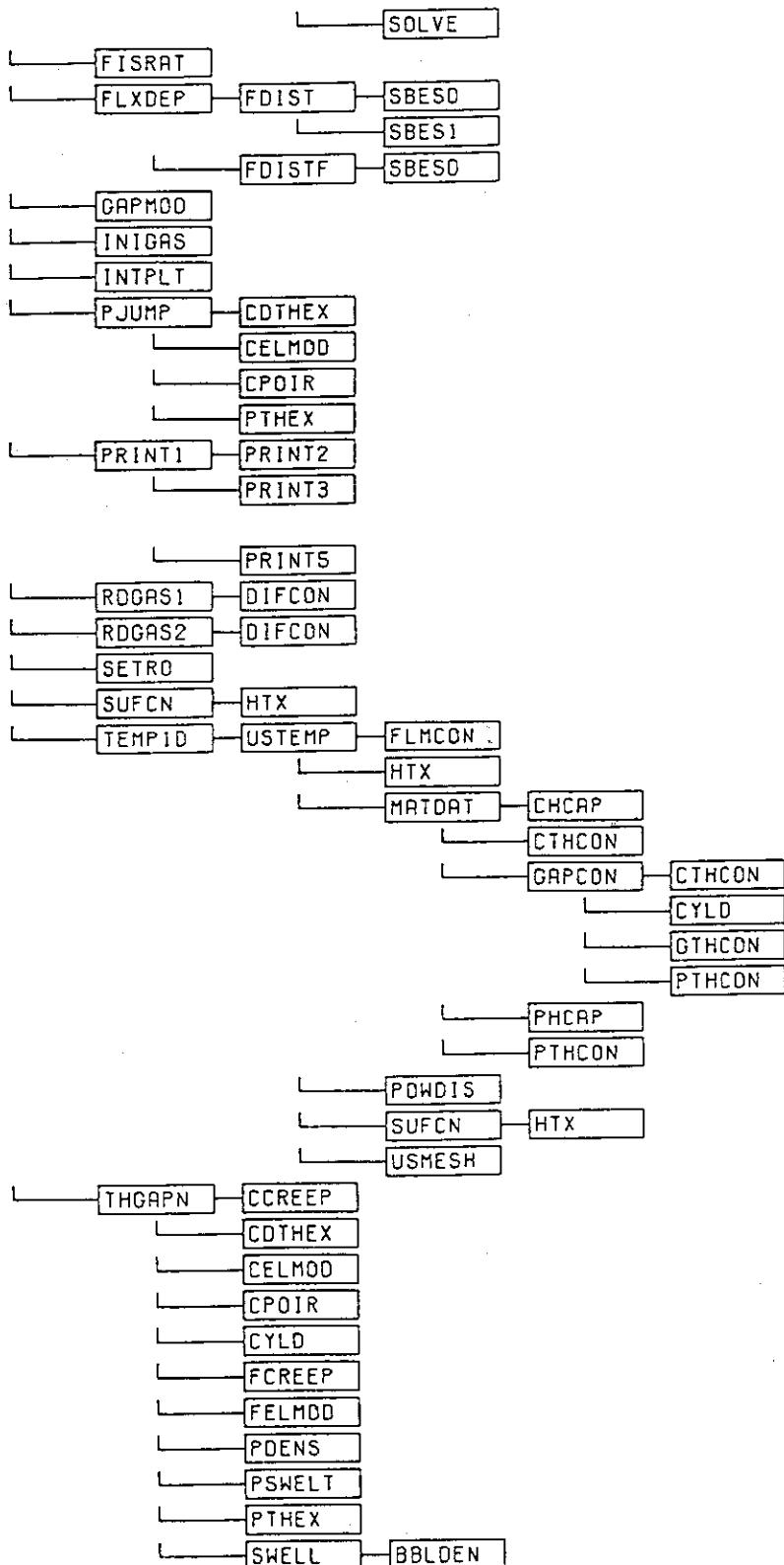


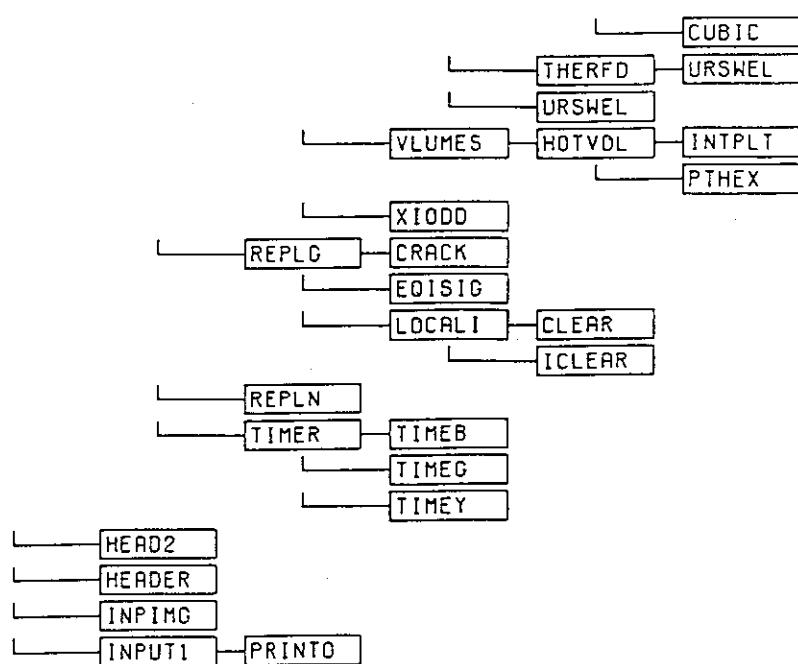












A 4 サンプル入出力

メモトル画題
(必ず出力される)

FUEL ELEMENT MODELING BY AXI-SYMMETRIC FINITE ELEMENT METHOD

Version 1.0

RUN DATE 9/1/jan/22

入力ファイルのカード1に記述したタイトルを表記

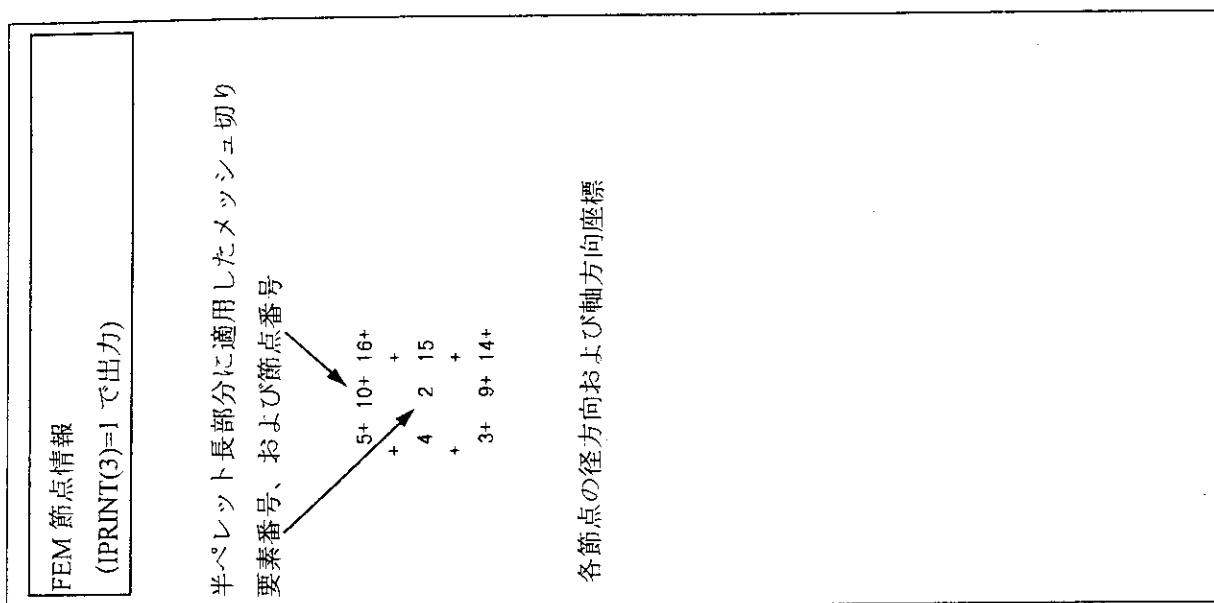
* * * * *
ZORITA-1 GROUP A < Z001P > NOMINAL
* * * * *

インプットデータリスト

(IPRINT(1)=1 で出力)

入力ファイルのイメージを出力

データ確認用カラムゲージ



```
*****  
* ZORITA-1 GROUP A < Z001P > NOMINAL  
*****
```

NODAL POINT AND ELEMENT CONNECTION MAP

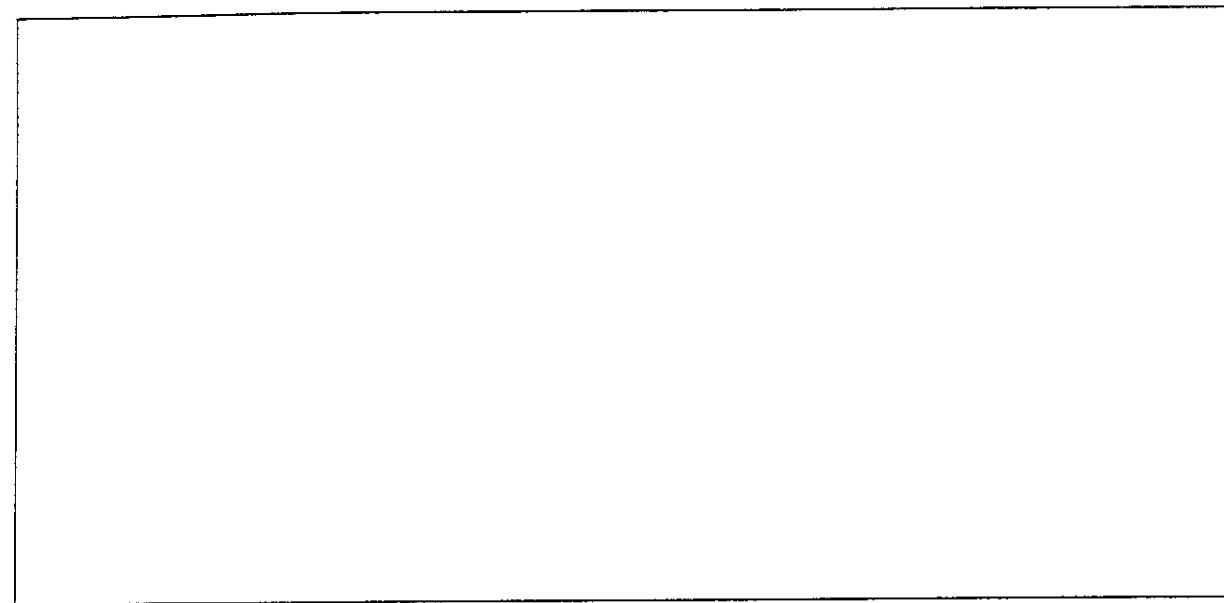
```
**** PELLET ****  
GAP **** CLADDING ****  
GAP **** NODAL COORDINATE (MICRON) ****  
GAP  
(Z-DIRECTION)  
(Z-DIRECTION)
```

	1+	1f+	18+	22+	29+	33+	40+	44+	51+	55+	62	1	69+	73+	80	
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	*
6	3	17	6	28	9	39	12	50	15	61	1	68	18	79		
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	*	
5+	10+	16+	21+	27+	32+	38+	43+	49+	54+	60	1	67+	72+	78		
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	*	
4	2	15	5	26	8	37	11	48	14	59	1	66	17	77		
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	*	
3+	9+	14+	20+	25+	31+	36+	42+	47+	53+	58	1	65+	71+	76		
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	*	
2	1	13	4	24	7	35	10	46	13	57	1	64	16	75		
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	*	
1+	8+	12+	19+	23+	30+	34+	41+	45+	52+	56	1	63+	70+	74		
															*	

NAMELIST PARAMETERS (1)		
INPUT OPTION	PARAMETER	DESCRIPTION
		DIMENSION
(1) OPTION FOR INPUT		
IBUMP	OPTION FOR BURNUP UNIT (=0: MWD/TU02, =1: MWD/TU, =2: GJ/KGU)	-
IDAY	OPTION FOR TIME UNIT (=0: HR, =1: DAY)	-
IFLX	OPTION TO GIVE RADIAL FLUX DEPRESSION PROFILE	-
IRH	POWER INCREMENT WIDTH FOR ATTENDED SEGMENT	-
PWCHG	MAGNIFICATION ON LRH BY MULTIPLYING THE FACTOR (1+PWCHG)	-
FAIW	FAST NEUTRON FLUX PER 1W/cm	N/GM2-SEC/W/cm 0.000E+00
(2) OPTION FOR CALCULATION		
INPCK	INPUT DATA CHECK OPTION (=0: CALCULATION, =1: INPUT DATA CHECK)	-
ICK1	FEM MECHANICAL CALCULATION OPTION (=0: CALCULATE, =1: NOT CALCULATE)	-
ICHI	FEM CALCULATION OPTION (LOCAL MODEL) (=0: NORMAL, =1: ELASTIC)	-
IELAST	ELASTIC CALCULATION OPTION (WHOLE ROD MODEL) (=0: NORMAL, =1: ELASTIC)	-
IMP	TERMAL CALCULATION OPTION (=0: STANDARD, =1: SIMPLE)	-
IFEURD	FEM MECHANICAL CALCULATION OPTION (=0: LOCAL MODEL, =1: WHOLE ROD MODEL)	-
TLM	LIMITING TIME FOR CPU	-
IST	OPTION FOR GAP GAS MODEL (=0: INPUT, =1: GAS FLOW MODEL)	SEC 20000.00 1
(3) CONDITION FOR CALCULATION		
ITIME	NUMBER OF HISTORY POINTS CHANGING PLENUM GAS PRESSURE	-
GASPN	PLENUM GAS PRESSURE AT THE HISTORY POINT	-
PLENM	PLENUM GAS VOLUME AT THE HISTORY POINT	-
GAINX	PLENUM GAS COMPOSITION AT THE HISTORY POINT (HE, N2, KR, XE)	-
LOPT1	BOTTOM PLENUM OPTION (=0: NO BOTTOM, =1: BOTTOM PLENUM IS PRESENT)	-
AKSU	ELASTIC CONSTANT OF UPPER PLENUM	N/N
XSL	THERMAL EXPANSION RATIO OF UPPER PLENUM SPRING	1/K
XSSL	ELASTIC CONSTANT OF LOWER PLENUM	N/N
AISL	THERMAL EXPANSION RATIO OF LOWER PLENUM SPRING	1/K
ANU	FRICITION COEFFICIENT BETWEEN PELLET AND CLADDING	1/K
DE	EQUIVALENT HYDRAULIC DIAMETER	CM
FAREA	FLOW AREA OF COOLANT	CM ²
PITCH	FUEL ROD PITCH	CM
DTPL	DIFFERENCE BETWEEN PLENUM TEMPERATURE AND COOLANT TEMP.	1/K
TRDM	ROOM TEMPERATURE	K 291.15

NAMELIST PARAMETERS (2)		
INPUT OPTION	PARAMETER	DESCRIPTION
		DIMENSION
(1) CONTROL OF TIME STEP		
IAUTO	OPTION FOR AUTOMATIC CONTROL OF TIME STEP	-
DPTX	UPPER LIMIT OF POWER DEPENDENT TIME STEP	W/cm
DPBU	UPPER LIMIT OF BURNUP DEPENDENT TIME STEP	MWD/TU02
IPH	POWER INCREMENT WIDTH FOR ATTENDED SEGMENT (=0: IFEM SEGMENT, =1: MAXIMUM POWER SEGMENT)	500.000 0

EFCDEF	CREEP DEPENDENT TIME STEP CONTROL PARAMETER	-	-	-	-	-
LMAX	MAXIMUM NUMBER OF JUDGEMENTS OF PHLET-CLAD CONTACT STATE	-	-	-	-	-
LMAX	NUMBER OF ITERATION OF NEWTON-LAPLACE METHOD	-	-	-	-	-
LTIMY	TIME STEP CONTROL OPTION FOR ELASTO-PLASTIC ANALYSIS	-	-	-	-	-
FAC	TIME STEP CONTROLLE FACTOR	-	-	-	-	-
(2) OPTION FOR THERMAL CONDUCTANCE						
IPTHIN	OPTION FOR PELLET THERMAL CONDUCTIVITY (=0, 1:NATPRO-09, =1:LYES)	-	-	-	-	-
MOX	MOX=1 ADOPTS MARTIN'S THERMAL CONDUCTIVITY FORMULA	-	-	-	-	-
PU	MOLE FRACTION WHEN MOX=1	-	-	-	-	-
Y	VALUE OF Y FOR MOX>1	-	-	-	-	-
IGD	IGD ADOPTS THERMAL CONDUCTIVITY FORMULA BY FUKUSHIMA	-	-	-	-	-
GD	DENSITY OF GD203 (WEIGHT FRACTION)	-	-	-	-	-
1. 000E+04		-	-	-	-	-
(3) OPTION FOR THERMAL EXPANSION						
IPTHX	OPTION FOR FORMULA OF PELLET THERMAL EXPANSION	-	-	-	-	-
ICA1HX	OPTION FOR FORMULA OF CLAD THERMAL EXPANSION	-	-	-	-	-
0		-	-	-	-	-
0		-	-	-	-	-
(4) OPTION FOR CREEP						
FCRFLC	MAGNIFICATION ON PELLET CREEP FORMULA (MECHANICAL MODEL)	-	-	-	-	-
TCS	CUT OFF VALUE OF TEMP. WITHIN PELLET CREEP GAL. (MECHANICAL MODEL)	K	1.000	2073.150	-	-
TCRFLC	MAGNIFICATION ON PELLET CREEP FORMULA (THERMAL MODEL)	-	-	-	-	-
TCRMX	CUT OFF VALUE OF TEMP. WITHIN PELLET CREEP GAL. (THERMAL MODEL)	K	1.000	1773.150	-	-
CREAC	MAGNIFICATION ON CLAD CREEP STRAIN RATE (MECHANICAL MODEL)	-	-	-	-	-
TCRCFC	MAGNIFICATION ON CLAD CREEP STRAIN RATE (THERMAL MODEL)	-	-	-	-	-
FATMAX	CUT OFF VALUE OF FAST NEWTRON FLUX WITHIN CLAD CREEP GAL.	N/cm ² /S	1.300	1.000	-	-
TPUGH=1	TAKES INTO ACCOUNT OF PLUG-S TURN OVER IN CLAD-CREEP GAL.	-	1.000E-14	1.000E-14	-	-
0		-	-	-	-	-
(5) OPTION FOR PELLET CRACK AND RELOCATION						
XREL0C	RELOCATION PARAMETER IN THERMAL CALCULATION	-	-	-	-	-
FRELOC	MECHANICAL RELOCATION PARAMETER	-	-	-	-	-
EPSRLZ	AXIAL RELOCATION PARAMETER	-	-	-	-	-
FACZ	OPTION FOR PELLET STIFFNESS RECOVERY IN RADIAL DIRECTION	-	-	-	-	-
FACZ	OPTION FOR PELLET STIFFNESS RECOVERY IN AXIAL DIRECTION	-	-	-	-	-
BURNUP	BURNUP AT WHICH PELLET RELOCATION STARTS	MWD/TU	0.200	0.500	-	-
BURNUP	BURNUP AT WHICH PELLET RELOCATION CEASES	MWD/TU	0.005	0.005	-	-
FURS	OPTION FOR PELLET GAS BUBBLE SWELLING CALCULATION	-	-	-	-	-
LYNG	PELLET CRACK MODEL OPTION (MECHANICAL MODEL)	-	-	-	-	-
ECRAC3	ELASTIC MODULUS OF PELLET AT THE TIME OF PERFECT CRACK (MECH. MODEL)	PA	1	1	-	-
EFAG	MAGNIFICATION ON ELASTIC MODULUS OF PELLET (MECHANICAL MODEL)	-	2.000E+09	2.000E+09	-	-
1.000		-	-	-	-	-
(6) OPTION FOR PELLET DENSIFICATION						
IDENSF	OPTION FOR FORMULA OF PELLET DENSIFICATION	-	-	-	-	-
DMAX	MAXIMUM VOLUME SHRINKAGE RATIO BY DENSIFICATION	%	0	0.960	-	-
SBU	BURNUP AT WHICH DENSIFICATION IS 90% COMPLETED (IDENSF = 0)	MWD/TU	10000.000	10000.000	-	-
TDSNF	SINTERING TEMPERATURE	K	2000.000	2000.000	-	-
GG	GRAIN SIZE AFTER HEAT TREATMENT	M	1.000E-05	1.000E-05	-	-
SITIM	INITIAL GRAIN SIZE (IDENSF = 3)	M	8.000E-06	8.000E-06	-	-
ADST	TIME OF HEAT TREATMENT (IDENSF = 3)	HR	24.000	24.000	-	-
AUST. FACT. (IDENSF = 4)	-	-	0.600	0.600	-	-
0		-	-	-	-	-
(7) OPTION FOR PELLET SWELLING MODEL						
IFSWEL	OPTION FOR PELLET SWELLING MODEL	-	-	-	-	-
SITCP	CONTACT PRESSURE LIMIT BEYOND WHICH GAS BUBBLE CANNOT OCCUR (MECHANICAL)	PA	0	-3.000E+07	-	-
SPCON	CONTACT PRESSURE LIMIT BEYOND WHICH GAS BUBBLE CANNOT OCCUR (THERMAL)	PA	-1.000E+06	-1.000E+06	-	-



ETA CONTROL PARAMETER (USED IN DETERMINING TIME STEP WIDTH)

(15) OPTION FOR CORROSION MODEL

ICORRO OPTION FOR CLAD WATERSIDE CORROSION MODEL

(16) OPTION FOR GAP CONDUCTANCE MODEL

IGAPCN OPTION FOR GAP CONDUCTANCE MODEL
ROUGHNESS OF PELLET SURFACE

(17) OPTION FOR LOCAL FEM MODEL

GAPLK MAXIMUM GAP SIZE FOR GENERATING AXIAL FORCE
AY TILTING VALUE

(18) Option for cladding anisotropy

HO(2) Cladding anisotropy parameter
FO(2) Cladding anisotropy parameter
GO(2) Cladding anisotropy parameter

NAMELIST PARAMETERS (3)

INPUT OPTION	OUTPUT OPTION	PARAMETER	DESCRIPTION
	=1: INPUT DATA LIST =2: FUEL DESIGN DATA =3: MESH AND GEOMETRY DATA =4: PARAMETERS LIST =5: HISTORY DATA LIST =6: THERMAL RESULTS =7: MECHANICAL RESULTS =8: THERMAL RESULTS =9: MECHANICAL RESULTS =10: FP GAS RESULTS =11: FP GAS RESULTS =12: FUEL-CLAD DISPLACEMENT =13: FUEL STRESS AND STRAIN =14: CLAD STRESS AND STRAIN =15: FINAL INFORMATION =16: THERMAL BEHAVIOR =17: FP GAS BEHAVIOR =18: MECHANICAL BEHAVIOR		

(1) OPTION FOR OUTPUT/ PLOTTING

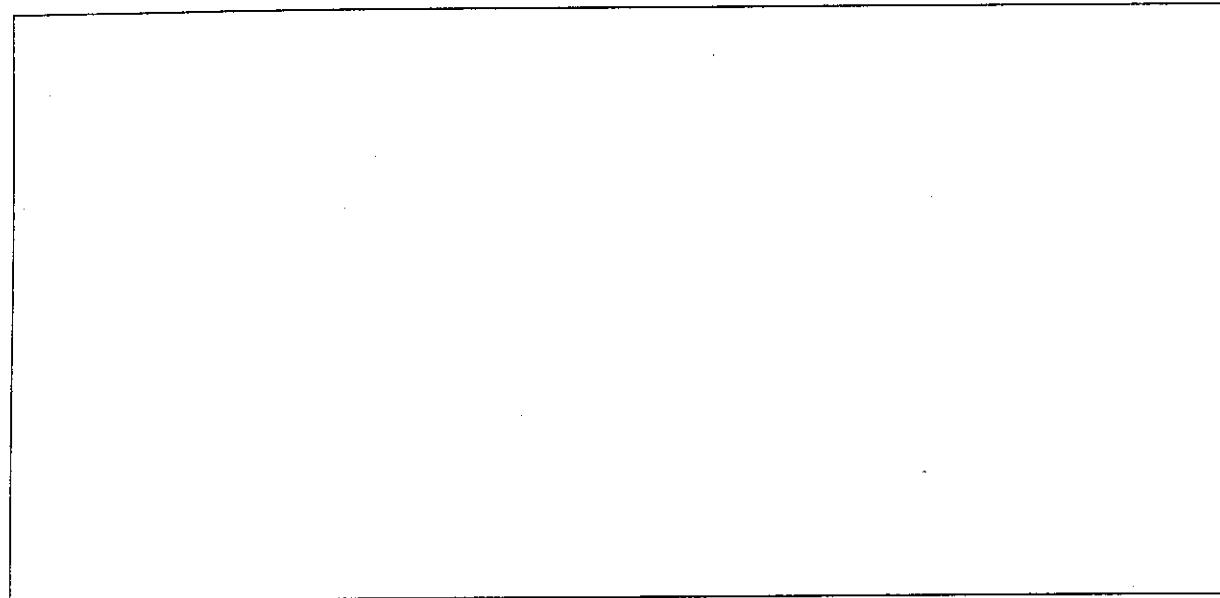
IPRINT	OUTPUT OPTION (=0:OFF ,=1:ON)		
	= 1: INPUT DATA LIST		
	= 2: FUEL DESIGN DATA		
	= 3: MESH AND GEOMETRY DATA		
	= 4: PARAMETERS LIST		
	= 5: HISTORY DATA LIST		(EVERY TIME STEP)
	= 6: THERMAL RESULTS		(EVERY TIME STEP)
	= 7: MECHANICAL RESULTS		(THERMAL MODEL)
	= 8: THERMAL RESULTS		(THERMAL MODEL)
	= 9: MECHANICAL RESULTS		(EVERY SEGMENT)
	=10: FP GAS RESULTS		(MUBLE RD)
	=11: FP GAS RESULTS		(MECHANICAL MODEL)
	=12: FUEL-CLAD DISPLACEMENT		(MECHANICAL MODEL)
	=13: FUEL STRESS AND STRAIN		(MECHANICAL MODEL)
	=14: CLAD STRESS AND STRAIN		(MECHANICAL MODEL)
	=15: FINAL INFORMATION		(PLOTTER)
	=16: THERMAL BEHAVIOR		(PLOTTER)
	=17: FP GAS BEHAVIOR		(PLOTTER)
	=18: MECHANICAL BEHAVIOR		

(2) OPTION FOR SEGMENT OUTPUT

INMOD AXIAL SEGMENT PRINT AND PLOTTER OPTION (=0:OFF ,=1:ON) 0 0 0 1 0 0 0 0 0

(3) OPTION FOR OUTPUT OF THERMAL CALCULATION

IWTHC THERMAL INFORMATION OUTPUT OPTION (=0:OFF ,=1:ON)
=1: TEMPERATURE
=2: GAP GAS



(4) OPTION FOR OUTPUT OF LOCAL FEM CALCULATION	
INFEM	MECHANICAL INFORMATION OUTPUT CONTROL TABLE (=0: OFF, =1: ON)
=3 : GRAIN RADIUS	
=4 : INT. BUBBLE RADIUS	
=5 : INT. BUBBLE DENSITY	
=6 : DIFFUSION COEF.	
=7 : EFFECT. DIF. COEF.	
=8 : GRAIN ATOMS	
=9 : BOUNDARY ATOMS	
=10 : RELEASED ATOMS	
=11 : GR. - BOUND. ATOMS	
=12 : GR. - BOUND. - REL. ATOMS	
=13 : PRODUCED ATOMS	
=14 : FISSION GAS RELEASE	
=15 : BOUNDARY DENSITY	
=16 : BOUND. - SAT. DENSITY	
=17 : BOUNDARY PRESSURE	
=18 : THERMAL INFORMATION	
=19 : THERMAL GENERAL OUTPUT	
<hr/>	
=1 : YIELD STRESSES	0
=2 : AXIAL STRESSES	1
=3 : CIRCUMFERENTIAL STRESSES	1
=4 : SHEAR STRESSES	0
=5 : EQUIVALENT STRESSES	0
=6 : YIELD STRESSES	0
=7 : RADIAL TOTAL STRAINS	0
=8 : AXIAL TOTAL STRAINS	0
=9 : CIRCUMFERENTIAL TOTAL STRAINS	0
=10 : SHEAR TOTAL STRAINS	0
=11 : EQUIVALENT PLASTIC STRAINS	0
=12 : RADIAL CREEP STRAINS	0
=13 : AXIAL CREEP STRAINS	0
=14 : CIRCUMFERENTIAL CREEP STRAINS	0
=15 : SHEAR CREEP STRAINS	0
=16 : EQUIVALENT CREEP STRAINS	0
=17 : RADIAL ELASTIC STRAINS	0
=18 : AXIAL ELASTIC STRAINS	0
=19 : CIRCUMFERENTIAL ELASTIC STRAINS	0
=20 : SHEAR ELASTIC STRAINS	0
=21 : RADIAL THERMAL STRAINS	0
=22 : AXIAL THERMAL STRAINS	0
=23 : STRAINS BY DENSIFICATION	0
=24 : STRAINS BY SWELLING	0
=25 : YOUNG S MODULUS IN RADIAL DIRECTION	0
=26 : YOUNG S MODULUS IN AXIAL DIRECTION	0
=27 : YOUNG S MODULUS IN CIRC. DIRECTION	0
=28 : RADIAL CREEP STRAINS RATE	0
=29 : AXIAL CREEP STRAINS RATE	0
=30 : CIRCUM. CREEP STRAINS RATE	0
=31 : SHEAR CREEP STRAINS RATE	0
=32 : EQUIL. CREEP STRAINS RATE	0
=33 : RADIAL STRAINS RATE	0
=34 : AXIAL STRAINS RATE	0
=35 : CIRCUMFERENTIAL STRAINS RATE	0
=36 : SHEAR STRAINS RATE	0
=37 : EQUIVALENT STRAINS RATE	0
=38 : EQUIVALENT STRAINS ENERGY	0
=39 : RADIAL DISTRIBUTION OF TEMP.	0
=40 : PELLET/CLADDING INTERACTION	0
=41 : PELLET/PELLETTE INTERACTION	0
=42 : DISPLACEMENT OF NODAL POINTS	0
=43 : PCML PLOT	0
=44 : CRACK/YIELD MAP	0
=45 : MECHANICAL CALC. CONDITION	0

(5) OPTION FOR OUTPUT OF WHOLE ROD FEM CALCULATION

IMR00	MECHANICAL INFORMATION OUTPUT CONTROL TABLE (=0:OFF, =1:ON)
= 1:RADIAL STRESS	0
= 2:GIRCUM. STRESS	0
= 3:AXIAL STRESS	0
= 4:EQUI. STRESS	0
= 5:YIELD STRESS	0
= 6:RADIAL CREEP STRAIN	0
= 7:GIRCUM. CREEP STRAIN	0
= 8:AXIAL CREEP STRAIN	0
= 9:EQUI. HARD STRAIN	0
=10:EQUI. PLAS. STRAIN	0
=11:SWELLING STRAIN	0
=12:RADIAL TOTAL STRAIN	0
=13:GIRCUM. TOTAL STRAIN	0
=14:AXIAL TOTAL STRAIN	0
=15: THERMAL STRAIN	0
=16: ELEMENT TEMPERATURE	0
=17:PRESSURE	0
=18: NODE DISPLACEMENT	0

(6) OPTION FOR GETTING PLOTTER TAPE

IPLT DRAW UP PLOTTER TAPE OPTIONS (=0: NO, =1: YES)
 IPLOPT INTERVAL OF TIME STEP POINT FOR DRAW UP PLOTTER TAPE

履歴データ (IPRINT(5)=1 で出力)											
STAGE NO. (NHFST)	TIME (H: M: S) (HH:MM:SS)	BURNUP (MWD/TUC2)		COOLANT TEMP. (K)		COOLANT PRESS. (MPA)		COOLANT VELOCITY (M/S)		HISTORY OPTION (0=OFF)	
		L	H	R	(W/GW)	(GJ/KGW)	(W/GW)	(W/GW)	(W/GW)	FLUX (N/cm ²)	NEUTRON FLUX (N/cm ²)
1	0: 0: 0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.0	555.15	13.79	6.5	5.3000+13	0
2	5: 0: 0	3.9	4.4	4.4	0.38	260.0	555.15	13.79	6.5	5.3000+13	0
3	2817:28:45	4407.2	5000.0	431.47	260.0	555.15	13.79	6.5	5.3000+13	0	0
4	5632:27:30	8814.5	10000.0	862.94	260.0	555.15	13.79	6.5	5.3000+13	0	0
5	8447:26:15	13221.7	15000.0	1294.40	260.0	555.15	13.79	6.5	5.3000+13	0	0
6	11262:25: 0	17628.9	20000.0	1725.87	260.0	555.15	13.79	6.5	5.3000+13	0	0
7	14077:23:45	22036.1	25000.0	2157.34	260.0	555.15	13.79	6.5	5.3000+13	0	0
8	17230:10:22	26932.2	30000.0	2640.58	260.0	555.15	13.79	6.5	5.3000+13	0	0
9	17235:10:22	26930.7	30000.0	2641.41	304.0	555.15	13.79	6.5	5.3000+13	-100	0
10	18386: 9:27	29087.7	33000.0	2847.69	304.0	555.15	13.79	6.5	5.3000+13	100	0
11	19830:41:11	31732.0	36000.0	3106.57	304.0	555.15	13.79	6.5	5.3000+13	100	0
12	21275:12:55	34376.4	39000.0	3365.45	304.0	555.15	13.79	6.5	5.3000+13	100	0
13	22080:29:56	37461.4	42500.0	3667.48	304.0	555.15	13.79	6.5	5.3000+13	100	0
14	22965:29:56	37470.1	42509.8	3668.32	269.0	555.15	13.79	6.5	5.3000+13	-100	0
15	24320:34:21	39665.1	45000.0	3883.21	269.0	555.15	13.79	6.5	5.3000+13	100	0
16	25953: 3: 4	42309.4	48000.0	4142.09	269.0	555.15	13.79	6.5	5.3000+13	100	0
17	27385:31:47	44953.7	51000.0	4400.97	269.0	555.15	13.79	6.5	5.3000+13	100	0
18	29218: 0:30	47598.1	54000.0	4659.85	269.0	555.15	13.79	6.5	5.3000+13	100	0
19	31122:34: 0	50683.1	57500.0	4961.88	269.0	555.15	13.79	6.5	5.3000+13	100	1
20	31127:34: 0	50691.2	57509.2	4962.67	269.0	555.15	13.79	6.5	5.3000+13	-100	0
21	31132:34: 0	50695.3	57513.8	4963.07	0.0	291.15	0.10	6.5	1.0000+09	-100	2

LAST STAGE NUMBER = 21

軸方向相対出力分布の履歴

STAGE (NHIST)	TIME (H: M: S)	L.H.R. (W/GM)	HISTORY DATA (2) *****												
			(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	AXIAL NODE 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	0	0
2	5: 0: 0	260.00	0.800	1.050	1.140	1.200	1.160	1.150	1.000	0.500	0	0	0	0	0
3	2817:28:45	260.00	0.800	1.050	1.140	1.200	1.160	1.150	1.000	0.500	0	0	0	0	0
4	5632:27:30	260.00	0.800	1.050	1.140	1.200	1.160	1.150	1.000	0.500	0	0	0	0	0
5	8447:26:15	260.00	0.800	1.050	1.140	1.200	1.160	1.150	1.000	0.500	0	0	0	0	0
6	11262:25: 0	260.00	0.800	1.050	1.140	1.200	1.160	1.150	1.000	0.500	0	0	0	0	0
7	14077:23:45	260.00	0.800	1.050	1.140	1.200	1.160	1.150	1.000	0.500	0	0	0	0	0
8	17230:10:22	260.00	0.800	1.050	1.140	1.200	1.160	1.150	1.000	0.500	0	0	0	0	0
9	17235:10:22	304.00	0.800	1.050	1.140	1.200	1.160	1.150	1.000	0.500	0	0	0	0	0
10	18386: 9:27	304.00	0.800	1.050	1.140	1.200	1.160	1.150	1.000	0.500	0	0	0	0	0
11	19830:41:11	304.00	0.800	1.050	1.140	1.200	1.160	1.150	1.000	0.500	0	0	0	0	0
12	21275:12:55	304.00	0.800	1.050	1.140	1.200	1.160	1.150	1.000	0.500	0	0	0	0	0
13	22960:29:56	304.00	0.800	1.050	1.140	1.200	1.160	1.150	1.000	0.500	0	0	0	0	0
14	22965:29:56	269.00	0.800	1.050	1.140	1.200	1.160	1.150	1.000	0.500	0	0	0	0	0
15	24320:34:21	269.00	0.800	1.050	1.140	1.200	1.160	1.150	1.000	0.500	0	0	0	0	0
16	25953: 3: 4	269.00	0.800	1.050	1.140	1.200	1.160	1.150	1.000	0.500	0	0	0	0	0
17	27585:31:47	269.00	0.800	1.050	1.140	1.200	1.160	1.150	1.000	0.500	0	0	0	0	0
18	29218: 0:30	269.00	0.800	1.050	1.140	1.200	1.160	1.150	1.000	0.500	0	0	0	0	0
19	31122:34: 0	269.00	0.800	1.050	1.140	1.200	1.160	1.150	1.000	0.500	0	0	0	0	0
20	31127:34: 0	269.00	0.800	1.050	1.140	1.200	1.160	1.150	1.000	0.500	0	0	0	0	0
21	31132:34: 0	0.00	0.800	1.050	1.140	1.200	1.160	1.150	1.000	0.500	0	0	0	0	0

FEW ANALYSIS IS APPLIED AT SEGMENT OF NUMBER 4.

タイムステップ毎の熱的結果 (IPRINT(6)=1 で出力)									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									
TIME 176 3112.57 HR 555.15 DEG.K 1.380+01 MPa									
STAGE NO. 1 2 3 * 4 5 6 7 8									
COOLANT TEMPERATURE 608.19 608.19 587.92 4.4251 4.3700 4.3700 4.3700 4.3700									
COOLANT PRESSURE 1.380+01 1.380+01 1.380+01 1.380+01 1.380+01 1.380+01 1.380+01 1.380+01									
L.H.R. BURN UP GAP CONDUCTANCE (W/CM**2 K) TOTAL GAS SOLID RAD. PS PS C1 C0 CONTACT FORCE (MPA) NODE									
NODE 1 215.200 40546.5 (MM/1002) 0.6915 0.6874 0.0000 0.0042 700.7 597.0 571.7 0.000 1									
2 282.450 532.17.3 1.6337 1.6337 0.0000 0.0040 672.0 614.7 581.8 0.025 2									
3 306.660 577.98.8 4.0453 4.0413 0.0000 0.0039 651.6 626.3 590.8 0.000 3									
* 4 322.800 608.19.7 4.4446 4.3628 0.0777 0.0041 661.8 631.5 600.5 0.000 4									
5 312.040 587.92.4 4.4251 4.3700 0.0508 0.0042 686.0 642.5 608.0 0.000 5									
6 309.350 582.85.6 4.5182 4.4390 0.0748 0.0044 672.9 650.0 614.9 0.000 6									
7 269.000 50683.1 2.2431 2.2387 0.0000 0.0044 683.5 643.5 612.9 0.000 7									
8 134.500 25341.6 0.4505 0.4521 0.0000 0.0044 708.2 708.2 610.0 49.39 1									
BURN UP FISS/CC *10**20) PELLET DISPLACEMENT (MICRONS)									
NODE 0 CSFR* PFAC* THERMAL DENSIFI IRRAD. RELOC. DISPLA CEMENT									
1 0 7508 2.0000 11.25 6.09 0.00 -31.06 43.68 15.52 0.98 -13.79									
2 0 75088 2.0000 14.76 4.85 0.00 -31.07 57.34 15.52 0.58 -21.92									
3 0 75068 2.0000 16.03 3.98 0.00 -31.07 62.25 15.52 1.45 -26.63									
* 4 0 75068 2.0000 16.87 4.41 -0.12 -31.07 65.53 15.52 1.80 -29.02									
5 0 75068 2.0000 16.31 4.59 -0.07 -31.07 63.34 15.52 2.15 -30.76									
6 0 75068 2.0000 16.17 4.89 -0.12 -31.07 62.80 15.52 2.34 -34.22									
7 0 75068 2.0000 14.96 5.34 0.00 -31.07 54.61 15.52 2.61 -31.28									
8 0 75068 2.0000 14.34 6.42 0.00 -31.07 54.61 15.52 2.47 -36.06									
CLAD SURFACE CLAD OUTER CORROSION TEMP (K) (MICRON/D) THICKNESS (MICRON)									
NODE 1 509.9 0.00936 4.23979									
2 507.3 0.01496 8.34932									
3 502.5 0.02183 14.03040									
* 4 507.5 0.03216 20.84818									
5 500.9 0.04065 26.41920									
6 504.4 0.05482 34.31954									
7 505.4 0.04957 33.69035									
8 509.8 0.02175 17.60615									
INITIAL GAS (MOL)									
= 5.460+02									
FISSION GAS RESULT									
LOCAL FISSION GAS RELEASE FRACTION (AXIAL NODE)									
1 0.00500 2 0.00500 3 0.00500 4 0.00500 5 0.00500 6 0.00500 7 0.00500 8 0.00500									
ROD AVERAGE FISSION GAS = 0.00500 FRACTIONS OF GAS MIXTURE (PERCENT)									
RELEASE FRACTION HE 1 2 3 4 5 AXIAL NODE									
ROD GAS PRESSURE (MPA) = 7.710 HE 98.6 98.6 98.7 98.8 98.9 99.0 99.1									
ROD GAS VOLUME (GM3) = 31.240 N2 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0									
(GAP, PLenum) = 0.658 KR 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.1 0.1									
TOTAL GAS (MOL) = 5.510+02 XE 1.2 1.2 1.2 1.1 1.0 0.9 0.8									
RELEASED IOXINE (GRAM/CM**2 K) = 4.370+06 (AVERAGE) 5.24D+06 (PEAK)									
PRODUCED GAS (MOL) HE N2 KR XE TOTAL									
RELEASED GAS (MOL) 0.000+00 0.000+00 1.33D+02 8.89D+02 1.02E+01									
ROD GAS (MOL) 0.000+00 0.000+00 6.64D+05 4.44D+04 5.11E+04									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									
***** OUTPUT ---STAGE--- 1/6 ***** IFEM = 4 *****									

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

TEMPERATURE DISTRIBUTION IN THE FUEL (SEG. C)							IWTHE= 1
SEG	HE	N ₂	KR	XE	GAP / PELLET	CLAD.	
8	435.07	435.07	435.07	435.07	435.07	435.07	435.07
7	410.36	410.36	410.36	410.36	410.36	410.36	410.36
6	399.74	399.74	399.74	399.73	399.73	399.73	399.73
5	392.84	392.84	392.84	392.84	392.84	392.84	392.84
4	386.61	386.61	386.61	386.61	386.61	386.61	386.61
3	378.41	378.41	378.41	378.41	378.41	378.40	378.40
2	398.85	398.85	398.85	398.85	398.85	398.85	398.85
1	427.59	427.59	427.59	427.59	427.59	427.58	427.58

GAP GAS INFORMATION (%)

IWTHE= 2							IWTHE= 3	IWTHE= 4
SEG	HE	N ₂	KR	XE	GAP / PELLET	CLAD.		
8	99.1	0.0	0.1	0.9				
7	99.0	0.0	0.1	0.9				
6	98.9	0.0	0.1	1.0				
5	98.8	0.0	0.2	1.0				
4	98.7	0.0	0.2	1.1				
3	98.7	0.0	0.2	1.1				
2	98.6	0.0	0.2	1.2				
1	98.6	0.0	0.2	1.2				

RADIUS OF GRAIN (MICRON)

IWTHE= 1							IWTHE= 2	IWTHE= 3	IWTHE= 4
SEG	HE	N ₂	KR	XE	GAP / PELLET	CLAD.			
8	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
7	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
6	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
5	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
4	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
3	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
2	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
1	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00

DENSITY OF INTRAGRANULAR GAS BUBBLE (BUBBLES/CM**3)							IWTHE= 5
SEG	1. 0900+18	1. 0900+18	1. 0900+18	1. 0900+18	1. 0900+18	1. 0900+18	1. 0900+18
8	9. 3840+17	9. 3840+17	9. 3840+17	9. 3840+17	9. 3840+17	9. 3840+17	9. 3840+17
7	9. 0790+17	9. 0790+17	9. 0790+17	9. 0790+17	9. 0790+17	9. 0790+17	9. 0790+17
6	9. 0600+17	9. 0600+17	9. 0600+17	9. 0600+17	9. 0600+17	9. 0600+17	9. 0600+17
5	9. 0600+17	9. 0600+17	9. 0600+17	9. 0600+17	9. 0600+17	9. 0600+17	9. 0600+17
4	8. 9870+17	8. 9870+17	8. 9870+17	8. 9870+17	8. 9870+17	8. 9870+17	8. 9870+17
3	8. 9890+17	8. 9890+17	8. 9890+17	8. 9890+17	8. 9890+17	8. 9890+17	8. 9890+17
2	9. 2780+17	9. 2780+17	9. 2780+17	9. 2780+17	9. 2780+17	9. 2780+17	9. 2780+17
1	9. 8740+17	9. 8740+17	9. 8740+17	9. 8740+17	9. 8740+17	9. 8740+17	9. 8740+17

DIFFUSION COEFFICIENT (CM**2/SEC)

EFFECTIVE DIFFUSION COEFFICIENT (CM**2/SEC)							IWTHE= 6
SEG	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17
8	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17
7	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17
6	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17
5	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17
4	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17
3	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17
2	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17
1	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17	2. 0000-17

NUMBER OF GAS ATOMS IN A GRAIN (ATOMS)							IWTHE= 7
SEG	1. 9820-17	1. 9820-17	1. 9820-17	1. 9820-17	1. 9820-17	1. 9820-17	1. 9820-17
8	1. 9830-17	1. 9830-17	1. 9830-17	1. 9830-17	1. 9830-17	1. 9830-17	1. 9830-17
7	1. 9830-17	1. 9830-17	1. 9830-17	1. 9830-17	1. 9830-17	1. 9830-17	1. 9830-17
6	1. 9830-17	1. 9830-17	1. 9830-17	1. 9830-17	1. 9830-17	1. 9830-17	1. 9830-17
5	1. 9830-17	1. 9830-17	1. 9830-17	1. 9830-17	1. 9830-17	1. 9830-17	1. 9830-17
4	1. 9830-17	1. 9830-17	1. 9830-17	1. 9830-17	1. 9830-17	1. 9830-17	1. 9830-17
3	1. 9830-17	1. 9830-17	1. 9830-17	1. 9830-17	1. 9830-17	1. 9830-17	1. 9830-17
2	1. 9830-17	1. 9830-17	1. 9830-17	1. 9830-17	1. 9830-17	1. 9830-17	1. 9830-17
1	1. 9820-17	1. 9820-17	1. 9820-17	1. 9820-17	1. 9820-17	1. 9820-17	1. 9820-17

NUMBER OF GAS ATOMS IN A BOUNDARY (ATOMS)							IWTHE= 8
SEG	4. 9660+09	1. 4970+10	2. 5210+10	3. 5820+10	4. 6970+10	5. 8800+10	7. 1460+10
8	2. 9500+10	7. 1650+10	5. 0420+10	5. 4910+10	5. 4910+10	5. 4910+10	5. 4910+10
7	1. 1420+10	3. 4440+10	5. 7980+10	8. 2390+10	1. 0810+11	1. 3520+11	1. 6440+11
6	1. 1520+10	3. 4740+10	5. 8480+10	8. 3110+10	1. 0910+11	1. 3640+11	1. 6580+11
5	1. 1920+10	3. 5540+10	6. 0500+10	8. 5970+10	1. 1200+11	1. 4110+11	1. 7150+11
4	1. 1920+10	3. 4140+10	5. 7470+10	8. 1680+10	1. 0710+11	1. 3410+11	1. 6290+11
3	1. 1920+10	3. 4140+10	5. 1440+10	5. 2940+10	7. 5230+10	9. 8630+10	1. 2350+11
2	1. 0430+10	3. 1440+10	4. 0330+10	5. 7520+10	7. 5150+10	9. 4080+10	1. 1430+11
1	7. 9450+09	2. 3960+10	4. 0330+10	5. 7520+10	7. 5150+10	9. 4080+10	1. 1430+11

NUMBER OF GAS ATOMS IN A BOUNDARY (ATOMS)

NUMBER OF GAS ATOMS IN A BOUNDARY (ATOMS)							IWTHE= 9
SEG	8. 7040+08	6. 2350+08	8. 8610+08	1. 1620+09	1. 4540+09	1. 7680+09	2. 1050+09
8	7. 4570+08	7. 4090+08	1. 2470+09	1. 7730+09	2. 3240+09	3. 5360+09	4. 2110+09
7	2. 4570+08	7. 4090+08	1. 2470+09	1. 7730+09	2. 3240+09	3. 5360+09	4. 2110+09

NUMBER OF GAS ATOMS IN A BOUNDARY (ATOMS)							IWTHE= 9
SEG	8. 7040+08	6. 2350+08	8. 8610+08	1. 1620+09	1. 4540+09	1. 7680+09	2. 1050+09
8	8. 7040+08	6. 2350+08	8. 8610+08	1. 1620+09	1. 4540+09	1. 7680+09	2. 1050+09
7	2. 4570+08	7. 4090+08	1. 2470+09	1. 7730+09	2. 3240+09	3. 5360+09	4. 2110+09

粒内ガスパブル密度

拡散係数

実効拡散係数

粒内マトリクス中のFPガス原子数

粒界でのFPガス原子数

NUMBER OF GAS ATOMS RELEASED TO FREE VOLUME (ATOMS)										IWTH= 10									
SEG	0.000D+00																		
8	8.521D+08	1.435D+09	2.039D+09	2.673D+09	3.346D+09	4.067D+09	4.844D+09	5.685D+09	6.600D+09	7.655D+09	8.686D+09	9.886D+09	1.054D+09	1.144D+09	1.144D+09	1.144D+09	1.144D+09	1.144D+09	
5	2.850D+08	8.595D+08	1.471D+09	2.056D+09	2.696D+09	3.375D+09	4.102D+09	4.886D+09	5.735D+09	6.658D+09	7.658D+09	8.686D+09	9.532D+09	1.054D+09	1.054D+09	1.054D+09	1.054D+09	1.054D+09	
4	9.910D+08	8.892D+08	1.497D+09	2.127D+09	2.789D+09	3.492D+09	4.244D+09	5.054D+09	5.932D+09	6.887D+09	7.887D+09	8.887D+09	9.543D+09	1.054D+09	1.054D+09	1.054D+09	1.054D+09	1.054D+09	
3	2.801D+08	8.447D+08	1.422D+09	2.021D+09	2.650D+09	3.310D+09	4.031D+09	4.713D+09	5.422D+09	6.368D+09	7.368D+09	8.368D+09	9.190D+09	1.028D+09	1.028D+09	1.028D+09	1.028D+09	1.028D+09	
2	2.580D+08	7.719D+08	1.310D+09	1.861D+09	2.440D+09	3.055D+09	3.713D+09	4.422D+09	5.190D+09	6.028D+09	6.828D+09	7.828D+09	8.369D+09	9.369D+09	1.028D+09	1.028D+09	1.028D+09	1.028D+09	
1	1.965D+08	5.926D+08	9.977D+08	1.418D+09	1.859D+09	2.327D+09	2.828D+09	3.369D+09	3.869D+09	4.369D+09	4.869D+09	5.369D+09	5.869D+09	6.369D+09	6.869D+09	7.369D+09	7.869D+09	8.369D+09	

NUMBER OF GAS ATOMS IN A GRAIN AND BOUNDARY (ATOMS)										IWTH= 11									
SEG	0.000D+00																		
8	5.089D+09	1.534D+10	2.583D+10	3.671D+10	4.813D+10	6.025D+10	7.323D+10	8.722D+10	1.024D+11	1.188D+11	1.352D+11	1.516D+11	1.680D+11	1.844D+11	2.007D+11	2.171D+11	2.337D+11	2.501D+11	
7	1.018D+10	3.069D+10	5.166D+10	7.342D+10	9.626D+10	1.205D+11	1.465D+11	1.744D+11	2.047D+11	2.377D+11	2.641D+11	2.905D+11	3.169D+11	3.433D+11	3.697D+11	3.961D+11	4.235D+11	4.509D+11	
6	1.710D+10	5.529D+10	8.443D+10	1.107D+11	1.436D+11	1.770D+11	2.117D+11	2.598D+11	3.038D+11	3.575D+11	4.113D+11	4.650D+11	5.187D+11	5.724D+11	6.260D+11	6.797D+11	7.334D+11	7.871D+11	
5	1.181D+10	3.560D+10	5.933D+10	8.516D+10	1.117D+11	1.398D+11	1.699D+11	2.023D+11	2.363D+11	2.757D+11	3.144D+11	3.535D+11	3.926D+11	4.317D+11	4.708D+11	5.099D+11	5.490D+11	5.881D+11	
4	1.221D+10	3.662D+10	6.209D+10	8.810D+10	1.155D+11	1.446D+11	1.757D+11	2.083D+11	2.457D+11	2.852D+11	3.140D+11	3.434D+11	3.735D+11	4.036D+11	4.334D+11	4.635D+11	5.036D+11	5.437D+11	
3	1.160D+10	3.489D+10	5.489D+10	8.100D+10	1.097D+11	1.374D+11	1.657D+11	2.003D+11	2.347D+11	2.757D+11	3.040D+11	3.334D+11	3.635D+11	3.936D+11	4.237D+11	4.538D+11	4.839D+11	5.140D+11	
2	1.069D+10	3.222D+10	5.452D+10	7.709D+10	1.011D+11	1.255D+11	1.528D+11	1.832D+11	2.150D+11	2.498D+11	2.791D+11	3.092D+11	3.393D+11	3.694D+11	4.095D+11	4.396D+11	4.697D+11	5.098D+11	
1	8.142D+09	2.455D+10	4.133D+10	5.873D+10	7.701D+10	9.840D+10	1.172D+11	1.395D+11	1.638D+11	1.902D+11	2.193D+11	2.494D+11	2.795D+11	3.096D+11	3.397D+11	3.698D+11	4.099D+11	4.399D+11	

NUMBER OF GAS ATOMS (GRAIN+BOUNDARY-RELEASED) (ATOMS)										IWTH= 12									
SEG	0.000D+00																		
8	5.089D+09	1.534D+10	2.583D+10	3.671D+10	4.813D+10	6.025D+10	7.323D+10	8.722D+10	1.024D+11	1.188D+11	1.352D+11	1.516D+11	1.680D+11	1.844D+11	2.007D+11	2.171D+11	2.337D+11	2.501D+11	
7	1.018D+10	3.069D+10	5.166D+10	7.342D+10	9.626D+10	1.205D+11	1.465D+11	1.744D+11	2.047D+11	2.377D+11	2.641D+11	2.905D+11	3.169D+11	3.433D+11	3.697D+11	4.000D+11	4.264D+11	4.528D+11	
6	1.710D+10	5.529D+10	8.443D+10	1.107D+11	1.436D+11	1.770D+11	2.117D+11	2.598D+11	3.038D+11	3.575D+11	4.113D+11	4.650D+11	5.187D+11	5.724D+11	6.260D+11	6.797D+11	7.334D+11	7.871D+11	
5	1.181D+10	3.560D+10	5.933D+10	8.516D+10	1.117D+11	1.398D+11	1.699D+11	2.023D+11	2.363D+11	2.757D+11	3.144D+11	3.434D+11	3.735D+11	4.036D+11	4.334D+11	4.635D+11	5.036D+11	5.437D+11	
4	1.221D+10	3.662D+10	6.209D+10	8.810D+10	1.097D+11	1.374D+11	1.657D+11	2.003D+11	2.347D+11	2.757D+11	3.040D+11	3.334D+11	3.635D+11	3.936D+11	4.095D+11	4.396D+11	4.697D+11	5.098D+11	
3	1.160D+10	3.489D+10	5.489D+10	8.100D+10	1.097D+11	1.374D+11	1.657D+11	2.003D+11	2.347D+11	2.757D+11	3.040D+11	3.334D+11	3.635D+11	3.936D+11	4.095D+11	4.396D+11	4.697D+11	5.098D+11	
2	1.069D+10	3.222D+10	5.452D+10	7.709D+10	1.011D+11	1.255D+11	1.528D+11	1.832D+11	2.150D+11	2.498D+11	2.791D+11	3.092D+11	3.393D+11	3.694D+11	4.095D+11	4.396D+11	4.697D+11	5.098D+11	
1	8.142D+09	2.455D+10	4.133D+10	5.873D+10	7.701D+10	9.840D+10	1.172D+11	1.395D+11	1.638D+11	1.902D+11	2.193D+11	2.494D+11	2.795D+11	3.096D+11	3.397D+11	3.698D+11	4.099D+11	4.399D+11	

PRODUCED FISSION GASES IN A GRAIN (ATOMS)										IWTH= 13									
SEG	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	
8	9.666D+10	9.718D+10	9.816D+10	9.966D+10	1.016D+11	1.041D+11	1.070D+11	1.105D+11	1.144D+11	1.188D+11	1.232D+11	1.279D+11	1.326D+11	1.374D+11	1.421D+11	1.468D+11	1.515D+11	1.562D+11	
7	1.933D+11	1.944D+11	1.963D+11	1.993D+11	2.023D+11	2.053D+11	2.083D+11	2.114D+11	2.141D+11	2.178D+11	2.215D+11	2.252D+11	2.289D+11	2.326D+11	2.363D+11	2.400D+11	2.437D+11	2.474D+11	
6	2.220D+11	2.235D+11	2.254D+11	2.277D+11	2.312D+11	2.357D+11	2.393D+11	2.434D+11	2.474D+11	2.514D+11	2.551D+11	2.588D+11	2.625D+11	2.662D+11	2.700D+11	2.737D+11	2.774D+11	2.811D+11	
5	2.243D+11	2.326D+11	2.390D+11	2.359D+11	2.319D+11	2.349D+11	2.389D+11	2.428D+11	2.468D+11	2.508D+11	2.548D+11	2.588D+11	2.628D+11	2.668D+11	2.708D+11	2.748D+11	2.788D+11	2.828D+11	
4	2.326D+11	2.332D+11	2.216D+11	2.230D+11	2.272D+11	2.317D+11	2.351D+11	2.387D+11	2.424D+11	2.461D+11	2.498D+11	2.535D+11	2.572D+11	2.609D+11	2.646D+11	2.683D+11	2.720D+11	2.757D+11	
3	2.204D+11	2.049D+11	2.425D+10</td																

FISSION GAS RELEASE RATE IN A RING (%)										IWTHF= 14									
SEG	8	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
7	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
6	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
5	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
4	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
3	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
2	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
1	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50

FPガス放出率

SATURATION DENSITY OF GAS ATOMS IN A BOUNDARY (ATOMS/CM**2)										IWTHF= 15									
SEG	8	9.100+13	1.179D+14	1.985D+14	2.821D+14	3.690D+14	4.620D+14	5.627D+14	6.701D+14	7.860D+14	8.701D+14	9.132D+14	9.620D+14	1.010D+15	1.060D+15	1.120D+15	1.341D+15	1.573D+15	1.827D+15
7	7.821D+13	2.358D+14	3.970D+14	5.642D+14	7.398D+14	9.261D+14	1.126D+15	1.341D+15	1.573D+15	1.827D+15	2.101D+15	2.119D+15	2.192D+15	2.683D+15	3.000D+15	3.555D+15	4.190D+15	5.142D+15	6.248D+15
6	6.950D+13	2.112D+14	4.583D+14	6.603D+14	8.546D+14	1.074D+15	1.304D+15	1.530D+15	1.760D+15	1.980D+15	2.211D+15	2.219D+15	2.432D+15	2.670D+15	3.000D+15	3.555D+15	4.190D+15	5.142D+15	6.248D+15
5	9.073D+13	2.731D+14	4.612D+14	6.630D+14	8.546D+14	1.074D+15	1.304D+15	1.530D+15	1.760D+15	1.980D+15	2.211D+15	2.219D+15	2.432D+15	2.670D+15	3.000D+15	3.555D+15	4.190D+15	5.142D+15	6.248D+15
4	9.386D+13	2.830D+14	4.765D+14	6.771D+14	8.878D+14	1.111D+15	1.351D+15	1.603D+15	1.868D+15	2.088D+15	2.322D+15	2.432D+15	2.670D+15	3.000D+15	3.555D+15	4.190D+15	5.142D+15	6.248D+15	7.040D+15
3	8.910D+13	2.680D+14	4.527D+14	6.433D+14	8.434D+14	1.056D+15	1.280D+15	1.512D+15	1.740D+15	1.974D+15	2.204D+15	2.314D+15	2.550D+15	2.880D+15	3.220D+15	3.560D+15	4.190D+15	5.142D+15	6.248D+15
2	8.210D+13	2.476D+14	4.169D+14	5.924D+14	7.680D+14	9.724D+14	1.182D+15	1.408D+15	1.632D+15	1.862D+15	2.092D+15	2.322D+15	2.550D+15	2.880D+15	3.220D+15	3.560D+15	4.190D+15	5.142D+15	6.248D+15
1	6.256D+13	1.886D+14	3.176D+14	4.513D+14	5.917D+14	7.408D+14	9.003D+14	1.072D+15	1.259D+15	1.461D+15	1.691D+15	1.921D+15	2.149D+15	2.479D+15	2.809D+15	3.139D+15	3.849D+15	4.461D+15	5.089D+15

粒界でのFPガス密度

SATURATION DENSITY OF GAS ATOMS IN A BOUNDARY (ATOMS/CM**2)										IWTHF= 16									
SEG	8	5.005D+15																	
7	5.186D+15																		
6	5.268D+15																		
5	5.320D+15																		
4	5.356D+15																		
3	5.440D+15																		
2	5.270D+15																		
1	5.058D+15																		

粒界で許容される最大FPガス密度

EXTERNAL STRESS IN A BOUNDARY (MPA)										IWTHF= 17									
SEG	8	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71
7	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71
6	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71
5	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71
4	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71
3	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71
2	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71
1	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71

粒界に加わる外部応力

MECHANICAL ANALYSIS INFORMATION
STAGE NO. 4
TIME 31122.57 HR
IFEM= 4 176
(PRINT(7)=1 で出力)
タイムステップ毎の力学的結果

タイムステップ番号、時刻、

LINEAR HEAT RATING
FAST NEUTRON FLUX
FISSION RATE
BURNUP

322.60 W/CM
5.30D+13 N/CM**2-S
1.48D+13 FISSIONS/CM**3-S
6.0BD+04 MM/THOU

線出力、高速中性子束、核分裂密度、燃焼度冷却材温度、冷却材圧力

以下IWFM(i)により指定した項目を出力
径方向温度分布

RADIAL TEMPERATURE DISTRIBUTION (DEG. C)

	PELLET	CLADDING	WFM = 39
388.61	388.61	388.61	388.61

PELLET/CLADDING MECHANICAL INTERACTION STATUS

NODAL POINT	CONTACT STATUS	INCREMENTAL STRESS (PA)		INCREMENTAL STRESS (PA)		RADIAL GAP (MICRONS)	
		AXIAL	RADIAL	AXIAL	RADIAL	AXIAL	RADIAL
62 - 69	FIXD	-2.9435D+04	0.0000D+00	-1.6459D+08	3.3504D+05	-2.9435D+04	0.0000D+00
61 - 68	FIXD	-1.8645D+04	-6.0842D+03	-1.9330D+06	1.3011D+05	8.8450D+04	6.0642D+03
60 - 67	FIXD	-1.8721D+04	-3.4927D+03	-1.9413D+06	4.0848D+05	1.8721D+04	3.4927D+03
59 - 66	FIXD	-2.0097D+04	-2.6799D+03	-1.7639D+06	3.1426D+05	2.0097D+04	2.6799D+03
58 - 65	FIXD	-1.8694D+04	-1.1090D+03	-1.7569D+06	1.7802D+05	1.8694D+04	1.1090D+03
57 - 64	FIXD	-1.9560D+04	-4.4339D+02	-1.7309D+06	7.7005D+04	1.9560D+04	4.4339D+02
56 - 63	FIXD	-1.9268D+04	0.0600D+00	-1.7185D+06	0.0600D+00	1.9268D+04	0.0600D+00

PELLET/PELLET MECHANICAL INTERACTION STATUS

NODAL POINT	CONTACT STATUS	AXIAL STRESS (PA)		AXIAL DISPLACEMENT (CM)		RADIAL GAP (MICRONS)	
		INCREMENTAL	TOTAL	CONTACT DISTANCE	MINIMUM DISTANCE	RADIAL GAP (MICRONS)	BOUNDARY
7	OPEN	0.0000D+00	0.0000D+00	7.3328D-01	7.6788D-01	3.4396D-02	-4.0766D-13
11	OPEN	0.0000D+00	0.0000D+00	7.3381D-01	7.6788D-01	3.3863D-02	-4.0766D-13
18	OPEN	0.0000D+00	0.0000D+00	7.3541D-01	7.6788D-01	3.2263D-02	-4.0766D-13
22	OPEN	0.0000D+00	0.0000D+00	7.3808D-01	7.6788D-01	2.9569D-02	-4.0766D-13
28	OPEN	0.0000D+00	0.0000D+00	7.4182D-01	7.6788D-01	2.5684D-02	-4.0766D-13
33	OPEN	0.0000D+00	0.0000D+00	7.4694D-01	7.6788D-01	2.0333D-02	-4.0766D-13
40	OPEN	0.0000D+00	0.0000D+00	7.5255D-01	7.6788D-01	1.5128D-02	-4.0766D-13
44	OPEN	0.0000D+00	0.0000D+00	7.5955D-01	7.6788D-01	8.1394D-03	-4.0766D-13
51	OPEN	0.0000D+00	0.0000D+00	7.6788D-01	7.6788D-01	6.4185D-05	-4.0766D-13
55	OPEN	0.0000D+00	0.0000D+00	7.6785D-01	7.6788D-01	2.9518D-05	-4.0766D-13
62	FIXD	4.9568D-05	4.9608D-05	7.6788D-01	7.6788D-01	0.0000D+00	-4.0766D-13

DISPLACEMENT OF NODES (IN GRON)

(R-DIRECTION)	0.0	5.1	10.2	15.3	20.4	25.5	30.6	35.9	41.2	46.7	GAP
0.0	10.4	10.4	20.8	31.2	41.7	52.4	-30.6	-28.0	-25.5	-30.6	-25.3

WFM = 41

PELETT/PELETTの接觸状態

接觸状態、接觸応力増分の径、軸方向成分
接觸応力の径、軸方向成分、片側ギャップ幅

ペレット/被覆管の接觸状態

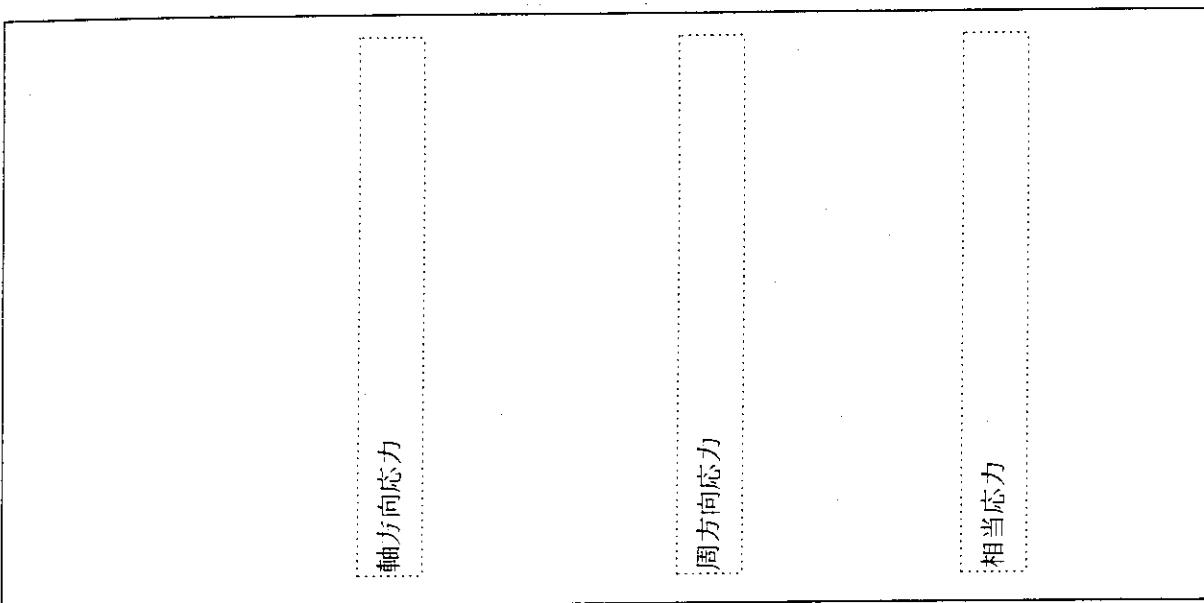
接觸状態、接觸応力増分の径、軸方向成分
接觸応力の径、軸方向成分、片側ギャップ幅

WFM = 42

ペレット/ペレットの接觸状態

接觸状態、軸方向応力増分、軸方向応力
軸方向変位、接觸境界、接觸境界までの距離

径、軸方向の節点変位

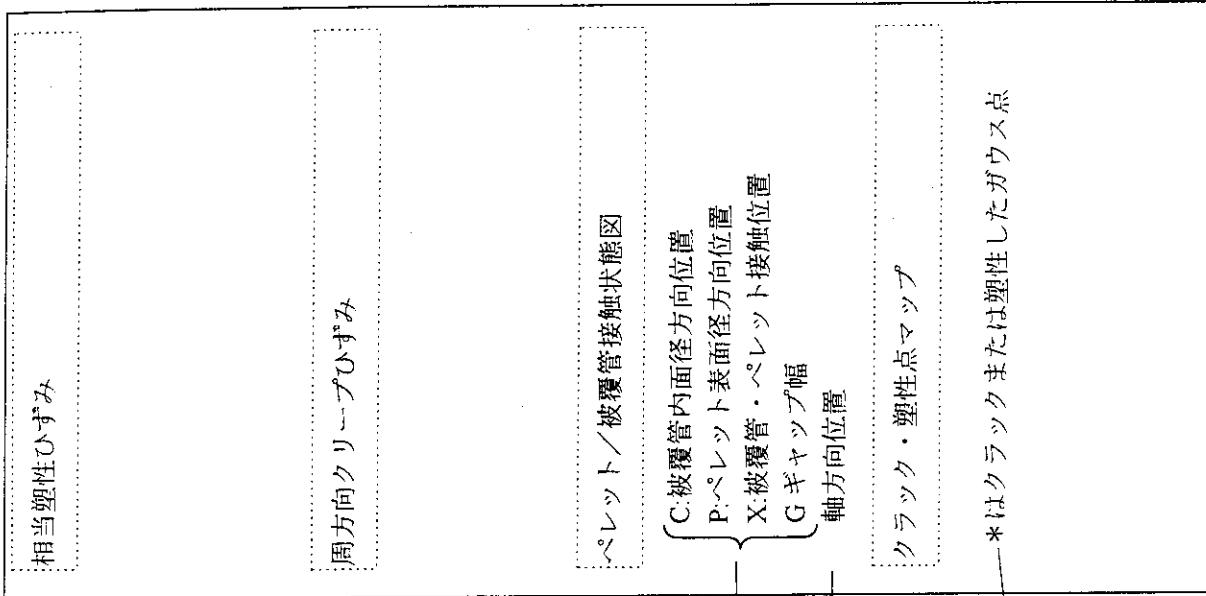
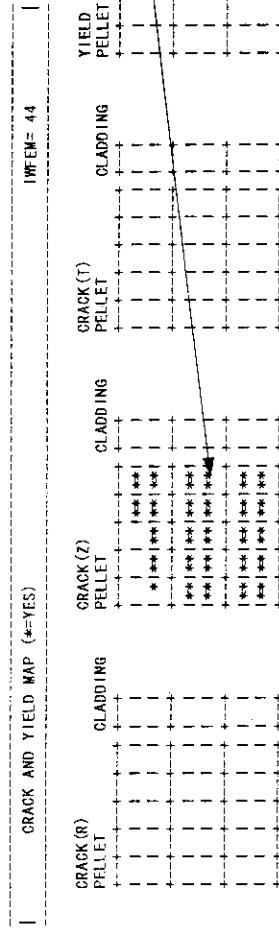
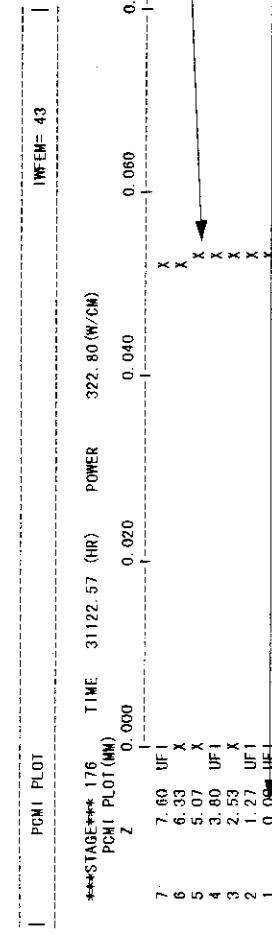
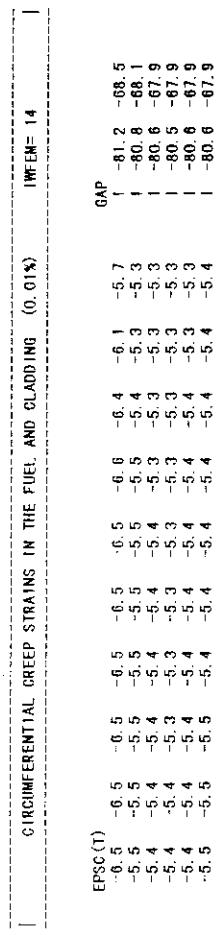
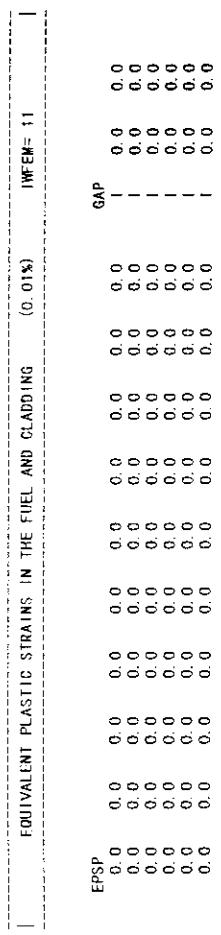


(7-DIRECTION)											
0.0	5.2	10.5	15.7	20.9	26.2	31.5	36.7	42.0	47.3	52.6	-30.4
0.0	10.5	21.0	31.5	42.1	52.6	42.1	47.3	52.6	52.6	-30.4	-27.6
0.0	5.3	10.5	15.8	21.0	26.3	31.6	36.8	42.1	47.3	52.6	-30.4
0.0	10.5	21.0	31.5	42.1	52.6	42.1	47.3	52.6	52.6	-30.4	-27.6
0.0	5.3	10.5	15.8	21.0	26.3	31.5	36.8	42.0	47.3	52.6	-30.4
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
72.8	72.9	73.1	73.4	73.8	74.3	74.9	75.6	76.1	76.5	76.8	45.6
60.7	61.6	62.6	62.6	62.6	62.6	62.6	62.6	62.6	62.6	64.5	38.0
48.8	48.8	48.9	49.1	49.4	49.8	50.3	50.8	51.5	51.7	51.9	30.3
36.7	36.8	37.2	37.2	37.8	37.8	38.8	38.8	39.1	39.1	22.7	22.7
24.6	24.6	24.6	24.7	24.9	25.1	25.3	25.6	26.0	26.1	15.1	15.1
12.3	12.3	12.5	12.7	12.7	12.7	12.7	13.0	13.0	13.0	7.6	7.6
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

AXIAL STRESSES IN THE FUEL AND THE GLASSING (MN/M ²) IWF#N= 2											
SIG(Z)											
-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.5
0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.6	0.6	0.6
0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.9	0.9
0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9
0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9

CIRCUMFERENTIAL STRESSES IN THE FUEL AND THE GLASSING (MN/M ²) IWF#N= 3											
SIG(T)											
-2.9	-2.9	-2.9	-2.8	-2.8	-2.8	-2.5	-2.5	-2.3	-2.2	-2.1	GAP -24.8 -31.4
-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-1.8	-1.8	-1.8	-2.0	-1.9	-26.8 -30.9
-1.8	-1.8	-1.8	-1.8	-1.8	-1.8	-1.6	-1.6	-1.6	-1.7	-1.7	-27.2 -31.8
-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-27.5 -32.8
-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-27.7 -33.2
-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-27.7 -33.5

EQUIVALENT STRESSES IN THE FUEL AND THE GLASSING (MN/M ²) IWF#N= 5											
EQ.SIG											
2.9	2.9	2.8	2.8	2.7	2.7	2.6	2.5	2.3	2.2	2.2	GAP 27.8 32.9
2.0	2.0	2.1	2.1	2.1	2.1	2.2	2.2	2.2	2.3	2.3	-28.0 32.4
2.0	2.0	2.1	2.1	2.1	2.1	2.2	2.2	2.2	2.3	2.3	-28.1 32.4
2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.2	2.2	2.2	2.3	2.3	-28.3 32.8
2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4	-28.4 33.1
2.2	2.2	2.3	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4	2.4	2.5	2.5	-28.6 33.2



THERMAL INFORMATION (SEGMENT NUMBER 4)									
POWER HISTORY		THERMAL INFORMATION							
STEP NO.	TIME (HR)	LINEAR HEAT RATE (W/CM)	BURNUP (MMD/TOD2)	FUEL CENTER (DEG.C)	FUEL SURFACE (DEG.C)	CLAD (DEG.C)	INNER (DEG.C)	OUTER (DEG.C)	GAP CONDUCTANCE (W/CM2 /C)
1	0.0	0.0	0.0	282.0	282.0	282.0	282.0	282.0	0.3410
33	5.0	312.0	4.7	563.4	563.4	349.6	313.5	4865	0.0000
45	2817.5	312.0	5288.7	584.7	584.7	350.2	314.1	0.4436	0.4805
56	5632.5	312.0	10577.3	575.9	575.9	350.4	314.3	0.4614	0.4373
67	8447.4	312.0	15886.0	556.4	556.4	350.6	314.4	0.5054	0.4553
78	11262.4	312.0	21154.7	534.0	534.0	350.7	314.6	0.5675	0.5618
89	14077.4	312.0	26443.4	510.8	510.8	350.8	314.7	0.6501	0.6468
101	17230.2	312.0	32366.7	485.4	485.4	352.0	315.9	0.7799	0.7748
107	17235.2	364.8	32376.9	512.5	512.5	363.0	321.7	0.8116	0.8000
113	18386.2	364.8	34905.2	500.2	500.2	364.3	322.4	0.8954	0.8960
120	19830.7	364.8	38078.4	484.8	484.8	365.6	323.7	1.0290	1.0148
127	21275.2	364.8	41251.7	469.2	469.2	366.7	324.9	1.1868	1.1817
135	22860.5	364.8	44953.7	450.9	450.9	368.2	326.4	1.4109	1.4661
140	23965.5	322.8	44964.1	434.6	434.6	358.6	321.4	1.4120	1.4120
147	24320.6	322.8	41598.1	422.5	422.5	359.4	322.3	1.7054	1.7009
154	25953.1	322.8	50771.3	407.8	407.8	360.5	323.4	2.2747	2.2704
161	27585.5	322.8	53944.5	392.9	392.9	361.7	324.6	3.4422	3.4380
168	29218.0	322.8	57117.7	387.8	387.8	362.9	325.8	4.3212	4.3068
176	31122.6	322.8	60819.7	388.6	388.6	364.4	327.4	4.4446	4.3628
177	31127.6	322.8	60829.5	388.7	388.7	364.5	327.5	4.4451	4.3636
210	3132.6	0.0	60834.3	18.0	18.0	18.0	18.0	2.4464	0.0016

着目セグメントについての熱的結果のまとめ
(PRINT(8)=1 で出力)

タイムステップ番号、時間、線出力、燃耗度
温度 (ペレット中心、ペレット表面、被覆管
内面、被覆管外面) ギャップコンダクタンス
(全、ガス、固体) 片側ギャップ幅、接触圧
力、ガス生成量、ガス放出率、ヨウ素濃度、
計算時間

RESULTS OF THERMAL ANALYSIS / MECHANICAL INFORMATION (SEGMENT NUMBER 4)

POWER HISTORY		FUEL						CLAD							
STEP NO.	TIME (HR)	LINEAR HEAT RATE (W/GM)	BURNUP (WMD/TW02)	THERMAL EXPAN -SION (MIC)	CREEP -ATION (MIC)	DENSIFI -ATION (MIC)	SMALL -ATION (MIC)	RELOC -ATION (MIC)	RADIAL -ITION (MIC)	CONTACT GAP (MIC)	THERMAL PRESSURE (MPA)	ELASTIC DEFORN -ATION (MIC)	RADIAL CREEP -ATION (MIC)	RADIAL DISPLA -EMENT (MIC)	CLAD -EMENT (MIC)
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15.5	15.5	62.1	0.0	0.0	0.0	0.0	
33	5.0	312.0	4.7	12.3	0.0	0.0	0.0	15.5	15.5	27.8	51.6	0.4	-0.3	1.8	
45	2817.5	312.0	5298.7	13.3	0.0	-21.9	5.7	15.5	12.6	57.5	0.0	1.7	0.3	-9.4	
56	5632.5	312.0	10577.3	12.9	0.0	-28.3	11.4	15.5	11.4	54.8	0.0	1.7	-13.5	-7.4	
67	8447.4	312.0	15886.0	11.9	0.0	-30.3	17.1	15.5	14.3	48.7	0.0	1.7	-16.7	-14.6	
78	11262.4	312.0	21154.7	10.9	0.0	-30.8	22.8	15.5	18.4	42.0	0.0	1.7	0.3	-19.3	
89	14077.4	312.0	26443.4	9.8	0.0	-31.0	28.5	15.5	22.8	35.3	0.0	1.7	-0.3	-17.2	
101	17235.2	312.0	32366.7	8.7	0.0	-31.0	34.9	15.5	28.0	27.9	0.0	1.7	0.4	-21.6	
107	17235.2	312.0	32376.9	9.9	0.0	-31.0	34.9	15.5	29.2	26.9	0.0	1.7	-0.4	-19.5	
113	18386.2	364.8	34905.2	9.3	0.0	-31.1	37.6	15.5	31.4	23.8	0.0	2.0	0.4	-23.9	
120	19830.7	364.8	38078.4	8.6	0.0	-31.1	41.0	15.5	34.1	20.0	0.0	2.1	0.5	-21.7	
127	21275.2	364.8	41251.7	7.9	0.0	-31.1	44.4	15.5	36.8	16.1	0.0	2.1	0.5	-22.3	
135	22865.5	364.8	44953.7	7.1	0.0	-31.1	48.4	15.5	40.0	11.7	0.0	2.2	0.5	-27.3	
140	22865.5	322.8	44964.1	6.4	0.0	-31.1	48.4	15.5	39.3	12.1	0.0	2.0	0.5	-24.6	
147	24320.6	322.8	47598.1	5.9	0.0	-31.1	51.3	15.5	41.6	9.0	0.0	2.0	0.5	-29.5	
154	25553.1	322.8	50771.3	5.2	0.0	-31.1	54.7	15.5	44.4	5.2	0.0	2.0	0.5	-30.6	
161	27585.5	322.8	53944.5	4.6	0.0	-31.1	58.1	15.5	47.2	1.4	0.0	2.1	0.6	-31.6	
168	29118.0	322.8	57117.7	4.4	0.0	-31.1	61.5	15.5	50.4	0.0	0.2	2.1	0.6	-32.6	
176	31112.6	322.8	60819.7	4.4	-0.1	-31.1	65.5	15.5	54.3	0.0	1.8	2.2	0.6	-33.6	
177	31127.6	322.8	60829.5	4.4	-0.1	-31.1	65.5	15.5	54.3	0.0	1.8	2.2	0.6	-33.5	
210	31132.6	0.0	60834.3	0.0	-0.1	-31.1	65.5	15.5	49.9	0.0	0.1	0.0	4.6	-33.5	

着目セグメントについての熱的結果のまとめ
力学的情報 (IMPRINT(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、やさしまり、スウェリング、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、接触圧
被覆管：
熱膨張、弹性、クリープ、全体の径方向変形量

RESULTS OF THERMAL ANALYSIS / FISSION GAS INFORMATION (SEGMENT NUMBER 4)

着目セグメントについての熱的結果

FPガス情報のまとめ

(IPRINT(10)=1で出力)

POWER HISTORY										FUEL CENTER										FUEL - G L A D									
STEP NO.	TIME (HR)	LINEAR HEAT RATE (W/CM)	BURNUP (MWD/TU02)	FUEL CENTER (DEG. C)	GRAIN TEMP (M.C.)	RADIUS (ANGST.)	DENSITY (BL/CM3)	DIFFUS. COEFF. (100-117 BL/CM3)	SATUR. /EFFECT BOUND. (100-16 CM2/S)	LOCAL FGR AT CENTER (100/13 A1/CM2)	AMOUNT OF GAS RELEASE IN GAP (10-3MOLE %)	Xe+Kr PERCENT IN GAP (%)	FISSION GAS RELEASE IN GAP (10-3MOLE %)	LOCAL FGR AT CENTER (%)	AMOUNT OF GAS RELEASE IN GAP (10-3MOLE %)	Xe+Kr PERCENT IN GAP (%)	FISSION GAS RELEASE IN GAP (10-3MOLE %)	LOCAL FGR AT CENTER (%)	AMOUNT OF GAS RELEASE IN GAP (10-3MOLE %)	Xe+Kr PERCENT IN GAP (%)									
1	0.0	0.0	0.0	282.0	5.00	0.00	19.35	0.2	0.20	0.0	567.7	0.50	0.50	1.31	0.00	0.00	0.50	0.50	0.50	0.00									
33	5.0	312.0	5288.7	563.4	5.00	0.06	19.12	0.2	0.20	0.0	408.3	0.50	0.50	0.95	0.00	0.00	0.50	0.50	0.50	0.00									
45	2817.5	312.0	10577.3	564.7	5.00	1.73	14.07	0.2	0.20	0.7	391.6	0.50	0.50	0.96	0.15	0.15	0.50	0.50	0.50	0.23									
56	5632.5	312.0	15866.0	575.9	5.00	2.32	12.74	0.2	0.20	1.5	385.0	0.50	0.50	0.94	0.23	0.23	0.50	0.50	0.50	0.32									
67	8447.4	312.0	15866.0	558.4	5.00	2.75	11.90	0.2	0.20	2.3	405.6	0.50	0.50	0.90	0.32	0.32	0.50	0.50	0.50	0.32									
78	11262.4	312.0	21164.7	534.0	5.00	3.09	11.29	0.2	0.20	3.1	419.2	0.50	0.50	0.86	0.41	0.41	0.50	0.50	0.50	0.41									
89	14077.4	312.0	26443.4	510.8	5.00	3.38	10.81	0.2	0.20	3.9	434.3	0.50	0.50	0.82	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.61									
101	17230.2	312.0	32366.7	485.4	5.00	3.66	10.37	0.2	0.20	4.9	452.4	0.50	0.50	0.78	0.61	0.61	0.50	0.50	0.50	0.61									
113	18386.2	364.8	34905.2	512.5	5.00	3.66	10.37	0.2	0.20	4.9	438.9	0.50	0.50	0.75	0.61	0.61	0.50	0.50	0.50	0.61									
120	19330.7	364.8	38078.4	484.8	5.00	3.90	10.01	0.2	0.20	5.7	458.3	0.50	0.50	0.71	0.75	0.75	0.50	0.50	0.50	0.75									
127	21275.2	364.8	41251.7	469.2	5.00	4.03	9.83	0.2	0.20	6.2	469.9	0.50	0.50	0.68	0.63	0.63	0.50	0.50	0.50	0.63									
135	22960.5	364.8	44953.7	450.9	5.00	4.16	9.65	0.2	0.20	6.8	484.3	0.50	0.50	0.66	0.63	0.63	0.50	0.50	0.50	0.63									
140	22965.5	322.8	44964.1	434.6	5.00	4.16	9.65	0.2	0.20	6.8	493.9	0.50	0.50	0.67	0.62	0.62	0.50	0.50	0.50	0.62									
147	24320.6	322.8	47598.1	422.5	5.00	4.26	9.52	0.2	0.20	7.3	504.2	0.50	0.50	0.66	0.61	0.61	0.50	0.50	0.50	0.61									
154	25953.1	322.8	50771.3	407.8	5.00	4.36	9.38	0.2	0.20	7.8	516.5	0.50	0.50	0.68	0.66	0.66	0.50	0.50	0.50	0.66									
161	27585.6	322.8	53944.5	392.9	5.00	4.47	9.25	0.2	0.20	8.3	528.3	0.50	0.50	0.70	0.63	0.63	0.50	0.50	0.50	0.63									
168	29218.0	322.8	57117.7	361.8	5.00	4.56	9.12	0.2	0.20	8.8	534.8	0.50	0.50	0.70	0.62	0.62	0.50	0.50	0.50	0.62									
176	31122.6	322.8	60819.7	388.6	5.00	4.67	8.99	0.2	0.20	9.4	535.6	0.50	0.50	0.70	0.67	0.67	0.50	0.50	0.50	0.67									
177	31127.6	322.8	60829.5	388.7	5.00	4.68	8.99	0.2	0.20	9.4	535.6	0.50	0.50	0.70	0.70	0.70	0.50	0.50	0.50	0.70									
210	31132.6	0.0	60834.3	18.0	5.00	4.68	8.99	0.2	0.20	9.4	746.8	0.50	0.50	0.78	1.21	1.21	0.50	0.50	0.50	1.21									

RESULTS OF THERMAL ANALYSIS / FISSION GAS INFORMATION (WHOLE FUEL ROD)											
POWER HISTORY				FUEL ROD				FP GAS INFORMATION			
STEP NO.	TIME (HR)	LINEAR HEAT RATE (W/CM)	BURNUP (10002 TU02) (1000/ FISS/GC)	PRODUCE (KE+KE) (KE+KR)	AMOUNT OF GAS RELEASED (1000-3 MOLE)	FRACTION OF GAS MIXTURE (HE+KR) (1000-3 MOLE)	TOTAL IN FUEL ROD (%)	Fraction of Gas Mixture (%)	FISSION GAS RELEASE PRESSURE (NPA)	INNER GAS RELEASE (%)	KR XE (%)
1	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	44.11	10.47	54.57	100.00	0.00	0.50
33	5.0	312.0	4.7	0.01	0.00	46.57	8.00	54.57	100.00	0.00	0.50
45	2817.5	312.0	5288.7	1.47	8.88	0.04	46.46	8.16	54.62	99.92	0.01
55	5632.5	312.0	10577.3	2.93	17.76	0.09	46.57	8.09	54.66	99.84	0.02
67	8447.4	312.0	15866.0	4.40	26.64	0.13	46.80	7.90	54.71	99.76	0.03
78	11262.4	312.0	21154.7	5.87	35.52	0.18	47.07	7.68	54.75	99.68	0.04
89	14077.4	312.0	26443.4	7.34	44.40	0.22	47.38	7.44	54.79	99.59	0.05
101	17230.2	312.0	32366.7	8.98	54.35	0.27	47.70	7.15	54.84	99.50	0.06
107	17235.2	312.0	32376.9	8.98	54.37	0.27	47.95	6.90	54.84	99.50	0.06
113	18386.2	312.0	34905.2	9.68	58.61	0.29	48.09	6.78	54.87	99.47	0.07
120	19830.7	364.8	38078.4	10.56	63.94	0.32	48.27	6.63	54.89	99.42	0.08
127	21275.2	364.8	41251.7	11.44	69.27	0.35	48.45	6.47	54.92	99.37	0.08
135	22960.5	364.8	44953.7	12.47	75.49	0.38	48.66	6.29	54.95	99.31	0.09
140	22965.5	322.8	44964.1	12.47	75.50	0.38	48.50	6.45	54.95	99.31	0.09
147	24320.6	322.8	47598.1	13.21	79.93	0.40	48.64	6.33	54.97	99.27	0.09
154	25953.1	322.8	50771.3	14.09	85.25	0.43	48.73	6.27	55.00	99.22	0.10
161	27585.5	322.8	53944.5	14.97	90.58	0.45	48.78	6.24	55.02	99.18	0.11
168	29218.0	322.8	57117.7	15.85	95.91	0.48	48.84	6.21	55.05	99.13	0.11
176	31122.6	322.8	60819.7	16.87	102.13	0.51	48.89	6.20	55.08	99.07	0.12
177	31127.6	322.8	60829.5	16.88	102.14	0.51	48.89	6.20	55.08	99.07	0.12
210	31132.6	0.0	60834.3	16.88	102.15	0.51	47.79	7.29	55.08	99.07	0.12
											0.81
											0.50
											3.76

燃料棒全体についての熱的結果

FP ガス情報のまとめ
(PRINT(11)=1 で出力)

タイムステップ番号、時間、線出力、燃焼度

燃料棒全体での

FP ガス生成量、放出量、プレナム中のガスモル数、ギヤップ中のガスモル数、全体のがスモル数、ガス組成比、FP ガス放出率、燃料棒内圧

RESULTS OF FEM MECHANICAL ANALYSIS / FUEL AND CLAD DEFORMATIONS (ANALYZED SEGMENT NUMBER 4)

POWER HISTORY		TOP OF FUEL		FUEL - CLAD AT TOP		CLADING		DIAMETRAL RIDGE	
STEP NO.	TIME (HR)	LINEAR HEAT RATE (W/CM)	BURNUP (MM/ TU02)	AXIAL DIPS.	RADIAL DIPS.	CONTACT PRESS.	CONTACT GAP AT TOP	RADIAL DISP. AT TOP	RIDGE HEIGHT (TOP-MID) (MIC)
		(W/CM)	(MM/TU02)	(MIC)	(MIC)	(MPA)	(MM)	(MIC)	(MIC)
1	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	24.53	39.74	0.00	0.00
33	5.0	312.0	4.7	19.11	20.00	0.00	28.95	0.00	2.23
45	2817.5	312.0	5208.7	-4.07	-4.26	0.00	-5.22	3.38	3.38
56	5632.5	312.0	10577.3	-6.13	-6.41	0.00	-7.87	12.81	-17.98
67	8447.4	312.0	15866.0	-2.19	-2.29	0.00	-2.81	27.79	-27.94
89	11262.4	312.0	21154.7	3.72	3.89	0.00	4.77	21.09	-21.07
101	14077.4	312.0	26443.4	10.19	10.66	0.00	13.08	6.68	-35.47
107	17235.2	364.8	32366.7	17.47	16.91	0.00	21.70	0.00	-35.47
113	18386.2	364.8	34005.2	18.85	17.57	0.00	23.22	0.00	0.00
120	19830.7	364.8	38078.4	19.67	18.66	0.00	20.47	0.00	0.00
127	21215.2	364.8	41251.7	20.19	19.49	0.00	18.75	0.00	0.00
135	22946.5	364.8	44953.7	20.62	20.49	0.00	16.46	0.00	0.00
140	22955.5	322.8	44964.1	20.00	20.07	0.00	15.45	0.00	0.00
147	24320.6	322.8	47598.1	20.18	20.61	0.00	13.86	0.00	0.00
154	25953.1	322.8	50771.3	20.29	21.17	0.00	11.88	0.00	0.00
161	27505.5	322.8	53944.5	20.30	21.51	0.00	9.95	0.00	0.00
176	31122.6	322.8	57117.7	20.64	22.11	0.00	8.53	0.00	0.00
177	31127.6	322.8	60829.5	21.40	22.94	0.00	7.40	0.00	0.00
210	31132.6	0.0	60834.3	-1.72	-2.61	0.00	-16.02	4.90	0.00

着目セグメントについての力学的結果
変形情報のまとめ

(PRINT(12)=1 で出力)

タイムステップ番号、時間、線出力、燃焼度
中心での軸方向変位、表面での軸方向変位、
中心孔の径方向変位、表面での径方向変位

ペレット：
片側ギヤップ幅、接触圧力（軸、径方向）

被覆管：
軸方向変位、径方向変位（リッジ部、中央）、
リッジ高さ（最大、リッジ部—中央部）

RESULTS OF FEM MECHANICAL ANALYSIS / STRESSES AND STRAINS IN FUEL (ANALYZED SEGMENT NUMBER 4)

着目セグメントについての力学的結果
ペレット応力ひずみ情報のまとめ
(PRINT(13)=1 で出力)

POWER HISTORY			TOP AND INNER OF FUEL												
STEP NO.	TIME (HR)	LINEAR HEAT RATE (MW/m ²)	CIRCUM. TOTAL STRAIN (0.01%)	AXIAL TOTAL STRAIN (0.01%)	RADIAL TOTAL STRAIN (0.01%)	CIRCUM. CREEP STRAIN (0.01%)	AXIAL CREEP STRAIN (0.01%)	RADIAL CREEP STRAIN (0.01%)	EQUIVA. CREEP STRAIN (0.01%)	EQUIVA. PLASTIC STRAIN (0.01%)	EQUIVA. RADIAL STRESS (MPA)	EQUIVA. AXIAL STRESS (MPA)	EQUIVA. RADIAL STRESS (MPA)	EQUIVA. AXIAL STRESS (MPA)	
			CIRCUM. STRAIN (0.01%)	AXIAL STRAIN (0.01%)	RADIAL STRAIN (0.01%)	CIRCUM. STRAIN (0.01%)	AXIAL STRAIN (0.01%)	RADIAL STRAIN (0.01%)	CIRCUM. STRAIN (0.01%)	AXIAL STRAIN (0.01%)	RADIAL STRAIN (0.01%)	CIRCUM. STRAIN (0.01%)	AXIAL STRAIN (0.01%)	RADIAL STRAIN (0.01%)	
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	104.	71.	104.	0.	0.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
33	5.0	312.0	4.7	130.	97.	130.	0.	0.	0.	0.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
45	2817.5	312.0	5288.7	98.	65.	98.	0.	0.	0.	0.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
56	5632.5	312.0	10577.3	96.	62.	96.	0.	0.	0.	0.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
67	8447.4	312.0	15866.0	101.	68.	101.	0.	0.	0.	0.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
78	11262.4	312.0	21154.7	109.	76.	109.	0.	0.	0.	0.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
89	14077.4	312.0	26443.4	118.	85.	118.	0.	0.	0.	0.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
101	17250.2	312.0	32366.7	127.	96.	127.	0.	0.	0.	0.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
113	18386.2	364.8	32376.9	128.	98.	129.	0.	0.	0.	0.	-0.7	0.0	-0.7	0.0	0.0
107	17235.2	364.8	34905.2	127.	98.	127.	-1.	-1.	-1.	0.	0.	-1.3	-0.1	-1.3	1.2
120	19830.7	364.8	386078.4	126.	99.	125.	-1.	-1.	-1.	0.	-1.3	-0.1	-1.3	1.3	1.3
127	21275.2	364.8	41725.7	123.	99.	123.	-2.	-2.	-2.	0.	-1.6	-0.1	-1.6	1.5	1.5
135	22960.5	364.8	44953.7	124.	99.	121.	-3.	-2.	-2.	0.	-1.7	-0.1	-1.7	1.7	1.7
140	22995.5	322.8	44964.1	120.	98.	120.	-3.	-3.	-3.	0.	-1.7	0.0	-1.7	1.7	1.7
147	24320.6	322.8	47998.1	118.	98.	118.	-4.	-4.	-4.	0.	-1.4	0.0	-1.4	1.3	1.3
154	25953.1	322.8	50771.3	115.	98.	116.	-4.	-4.	-4.	0.	-1.7	0.0	-1.7	1.7	1.7
161	27565.6	322.8	53944.5	113.	98.	113.	-5.	-5.	-5.	0.	-1.9	0.0	-1.9	1.9	1.9
68	29218.0	322.8	57117.7	112.	98.	112.	-6.	-6.	-6.	0.	-2.0	0.0	-2.0	2.0	2.0
176	31122.6	322.8	6019.7	100.	110.	100.	-7.	-7.	-7.	0.	-2.5	-0.1	-2.5	2.5	2.5
177	31127.6	322.8	60329.5	110.	100.	110.	-7.	-7.	-7.	0.	-3.0	-0.1	-3.0	2.9	2.9
210	31132.6	0.0	60334.3	84.	70.	85.	-7.	-7.	-7.	0.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

着目セグメントについての力学的結果
被覆管応力ひずみ情報のまとめ
(IPRINT(14)=1 で出力)

RESULTS OF FEM MECHANICAL ANALYSIS / STRESSES AND STRAINS IN CLAD (ANALYZED SEGMENT NUMBER 4)											
TOP AND INNER OF CLADING											
POWER HISTORY			CIRCUM. AXIAL			RADIAL CIRCUM.			EQUIVA. RADIAL		
STEP NO.	TIME (HR)	LINEAR HEAT RATE (MW/CM)	BURNUP (MMO/TU02)	CIRCUM. STRAIN (0.01%)	AXIAL STRAIN (0.01%)	TOTAL STRAIN (0.01%)	CREEP STRAIN (0.01%)	STRAIN (0.01%)	CIRCUM. STRAIN (0.01%)	AXIAL STRAIN (0.01%)	EQUIVA. STRESS (MPA)
1	0.0	0.0	0.0	11.3	11.4	20.8	0.0	0.0	0.0	0.0	-71.3
33	5.0	312.0	4.7	14.5	14.0	25.7	-0.9	0.1	0.8	1.0	-36.0
45	2817.5	312.0	5288.7	9.2	27.9	46.6	-28.7	3.4	23.3	28.0	-61.0
56	5632.5	312.0	10677.3	-20.3	34.1	56.0	-37.8	5.0	32.8	40.0	-60.4
67	8447.4	312.0	15886.0	-28.7	38.8	63.2	-46.2	6.3	39.9	49.1	-59.8
78	11262.4	312.0	21154.7	-35.6	42.8	69.1	-53.2	7.4	45.9	56.6	-59.3
89	14077.4	312.0	26443.4	-41.6	46.3	74.1	-59.3	8.4	51.0	63.2	-58.7
101	17230.2	312.0	32366.7	-46.4	50.0	78.4	-65.2	9.3	55.8	69.4	-50.1
107	17235.2	364.8	32376.9	-44.9	50.7	78.4	-65.2	9.3	55.9	69.5	0.0
113	18386.2	364.8	34905.2	-46.0	51.1	79.6	-66.4	9.5	56.9	70.7	0.0
120	19830.7	364.8	38078.4	-47.6	52.2	81.6	-68.0	9.6	58.4	72.6	0.0
127	21275.2	364.8	41251.7	-49.3	53.3	83.3	-69.8	9.7	60.0	74.5	0.0
135	22960.5	364.8	44953.7	-51.6	54.8	85.5	-71.9	9.9	62.0	76.9	0.0
140	22965.5	322.8	44964.1	-52.6	54.7	85.0	-71.9	9.9	62.0	76.9	0.0
147	24320.6	322.8	47598.1	-54.1	55.9	86.5	-73.6	10.1	63.5	78.8	0.0
154	25953.1	322.8	50771.3	-56.1	57.3	88.3	-75.6	10.4	65.2	80.9	0.0
161	27585.5	322.8	53944.5	-58.0	58.6	90.1	-77.6	10.8	66.9	83.1	0.0
168	29218.0	322.8	57117.7	-59.4	59.8	91.6	-79.5	11.0	68.5	85.1	0.0
176	31122.6	322.8	60819.7	-60.5	60.5	93.0	-81.2	11.1	70.0	87.0	0.0
177	31127.6	322.8	60829.5	-60.5	60.9	93.0	-81.2	11.1	70.1	87.0	0.0
210	31132.6	0.0	60834.3	-75.9	48.2	65.8	-81.2	11.1	70.1	87.0	0.0

主要項目についての最終結果のまとめ
(PRINT(15)=1 で出力)

タイトル、着目セグメント番号

		ITEM 4	
FINAL INFORMATION			
STAGE	210	CALC. TIMES	664
MAX. TIME (HR)	31132.6	MAX. DEL.DR (MIC)	3.4
MAX. LHR (W/GM)	364.8	MAX. DEL.DN (MIC)	3.4
IN1. GAP (MIC)	166.0	MAX. DEL.R (MIC)	0.0
BURNUP (MWD/TU02)	60834.3	R. MAXES.G (NPA)	54.9
MAX. TEMP (DEG C)	584.7	R. MAXSGZ (NPA)	27.0
F.G.R. (%)	0.5	R. MAXS.GT (NPA)	43.1
1GD (10-5 GRAM/GM2)	0.4	MAX. EDS.G (NPA)	54.9
CR. DOWN (AV.) (MIC)	-80.8	MAX. SIGZ (NPA)	27.1
CR. DOWN (MAX) (MIC)	-81.3	MAX. SIGT (NPA)	43.1
DEL. DR (MIC)	-81.3	AV. GAP (MIC)	10.8
DEL. DN (MIC)	-80.7	R. GAP (MIC)	9.8
DEL. R.GDE (MIC)	-0.7	CONTACT LHR (W/GM)	312.0

全タイムステップ数、照射時間、最大線出力、初期ギヤップ幅、到達燃焼度、最大温度、ヨウ素濃度、指定したタイムステップでのクリープダウン（平均）、指定したタイムステップでのクリープダウン（最大）、照射後被覆管リッジ部変位、照射後被覆管中央部変位、照
射後被覆管リッジ高さ

計算総ステップ数、被覆管リッジ部最大変位、被覆管中央部最大変位、被覆管最大相当応力、被覆管リッジ部最大軸方向応力、被覆管リッジ部最大周方向応力、被覆管最大相当応力、被覆管最大軸方向応力、被覆管最大周方向応力、指定したタイムステップでの平均ギヤップ幅（直径）、指定したタイムステップでのリッジ部ギヤップ幅（直径）、接触開始時の線出力