

高速増殖大型炉設計研究

—燃料設計手法の合理化検討—

区 分 変 更	
変更後資料番号	PNC TN9410 90-066
決裁年月日	平成 10 年 3 月 26 日

1990年 5 月

動力炉・核燃料開発事業団
大 洗 工 学 セ ン タ ー

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、限られた関係者だけに配布するものです。従って、その取扱いには十分注意を払って下さい。なお、この資料の供覧、複製、転載、引用等には事業団の承認が必要です。

高速増殖大型炉設計研究

- 燃料設計手法の合理化検討 -

菰田成一^{*a}、西村正洋^{*c}、前田章雄^{*d}、金城勝哉^{*b}

要 旨

(目的と手法の特徴) 本研究の第一の目的は、FBR燃料ピンのガスプレナム部必要最小長さを確定論的に求めるための設計手法を開発するとともに、確率論的アプローチ(モンテカルロ計算)も実施することで、その手法の妥当性を裏付けることにある。本手法の概要は以下のようなものである。主要な誤差因子を考慮するための一定の手順に従って、FPガス圧に起因する被覆管周方向応力 σ_{θ} の信頼上限値を評価する。次に、この信頼上限値を用いて、クリープ損傷和CDFの信頼上限値を評価する。求めた σ_{θ} とCDFの信頼上限値を設計制限値と比較することによって、前提としたプレナム部長さがFPガスを収容する上で十分かどうかを判定する。

第二の目的は、設計上許容できる燃料スミア密度最大値を求めるための設計手法を開発することである。本手法の概要は以下のようなものである。CEDARコードを用いて、ガス圧だけではなくペレット・被覆管間の機械的相互作用(PCMI)による圧力も考慮した σ_{θ} とCDFを計算し、設計制限値と比較する。この際、ガス圧だけによる σ_{θ} 計算値が、上記の設計手法で得られる σ_{θ} の信頼上限値にほぼ一致するように、CEDARの入力データを調整する。

(適用例) 被覆管材がそれぞれ改良オーステナイト鋼および酸化物分散強化型フェライト鋼である63年度設計の100万kWeおよび150万kWe FBRの燃料ピンに、これらの設計手法を適用した。前者の設計手法を100万kWe FBRに適用したケースでは、通常運転状態だけではなく過渡変化状態も検討対象とした。

(主要な結論) ① 確率論的計算にて、前者の設計手法の妥当性を確認した。② 従来の「もんじゅ」で採用している保守的手法と比較して、同設計手法は、ガスプレナム部を約35%だけ短尺化できることが分かった。③ 上記FBRで採用している約88%T.D.のスミア密度は、通常運転状態におけるPCMI挙動の観点に限定してであるが、許容できることが分かった。

*a 大洗工学センター、技術開発部、プラント工学室

*b 大洗工学センター、技術開発部、プラント工学室 (現 実験炉部、技術課)

*c 株式会社アイ・エス・エル

*d 株式会社アイ・エス・エル (現 株式会社エイ・エス・アイ)

Design Study on Large Scale FBRs

Study on rationalization of fuel design methods

Seiichi Komoda^{*a}, Masahiro Nishimura^{*c}, Akio Maeda^{*d} and Katsuya Kinjo^{*b}

Abstract

One of the aims in this study is to present a design method which gives the allowable minimum length of gas plenum section in FBR fuel pins on the basis of the deterministic approach and, in addition, to justify the method by the probabilistic approach based on the Monte-Carlo technique. The outline of the method is as follows. The upper confidence limit on the circumferential cladding stress, σ_θ , due to the fission gas pressure is evaluated by going through a certain procedure to take account of major error sources. Successively, the upper confidence limit on the cumulative damage fraction (hereafter referred to CDF) are evaluated by using the upper confidence limit on σ_θ . Finally, the upper confidence limits on σ_θ and CDF are compared with the design limits in order to judge whether the gas plenum section is long enough to accommodate the fission gas or not.

The other aim is to present another design method which gives the allowable maximum value of fuel smear density. The outline of the method is as follows. σ_θ and CDF not only due to the gas pressure but also due to the pellet-cladding-mechanical-interaction (hereafter referred to PCMI) pressure are calculated using the CEDAR code, and they are compared with the design limits. Here, the input data for CEDAR are adjusted such that the calculated value of σ_θ only due to the gas pressure is nearly equal to the upper confidence limit on σ_θ obtained by the above-mentioned design method.

The two methods are applied to the fuel pins in the FBRs of 1,000 MWe and 1,500 MWe designed in the year before last whose cladding materials are the advanced austenitic steel and oxide dispersion strengthening ferritic steel, respectively. Not only the normal but also upset operational conditions are considered in the application of the former method to the FBR of 1,000 MWe.

The main conclusions drawn in this study are as follows. The former design method can be justified by the probabilistic calculations, and it is found that the method leads to the shorter gas plenum section by about 35 % than the conventional conservative method adopted in "Monju" design. The fuel smear density, about 88 % T.D., adopted in the above-mentioned FBRs, turns out to be allowable in view of PCMI behaviors in the normal operational condition.

*a Plant Engineering Office, Technology Development Division, Oarai Engineering Center

*b Plant Engineering Office, Technology Development Division, Oarai Engineering Center
(Present address : Reactor Technology Section, Experimental Reactor Division)

*c I. S. L. Incorporated

*d I. S. L. Incorporated (Present address : A. S. I. Incorporated)

目次

第1章 概要	- 1 -
第2章 評価手法	- 3 -
2.1 従来評価手法のレビュー	- 3 -
2.2 新たな評価手法の提案	- 5 -
第3章 ガス圧応力評価手法の適用	- 9 -
3.1 改良オーステナイト鋼製燃料ピンへの適用	- 9 -
3.2 ODS鋼製燃料ピンへの適用	- 11 -
第4章 ガス圧応力評価手法妥当性の評価	- 12 -
4.1 改良オーステナイト鋼製燃料ピンの確率論的評価	- 12 -
4.2 被覆管応力およびCDF上限値の信頼度評価	- 15 -
第5章 PCMI圧応力評価手法の適用	- 17 -
5.1 改良オーステナイト鋼製燃料ピンへの適用	- 17 -
5.2 ODS鋼製燃料ピンへの適用	- 18 -
5.3 照射実績に基づくスミア密度の検討	- 19 -
第6章 結言	- 20 -
6.1 成果のまとめ	- 20 -
6.2 今後の課題	- 21 -
謝 辞	- 22 -
参考文献	- 23 -
Appendix HOPEコードのマニュアル	- 51 -
A コード概要	- 51 -
B 計算手法	- 54 -
C 物性式	- 62 -
D 入力データ	- 69 -
E ジョブ制御文	- 78 -
F 出力リスト	- 79 -
G プログラム説明	- 96 -

表 リ ス ト

第2.1表	PCMIを考慮した従来評価手法における統計処理対象誤差-----	24
第2.2表	PCMIを考慮した従来評価手法による評価結果の一例-----	24
第2.3表	被覆管上限応力評価における基準解析および感度解析の主要条件-----	25
第2.4表	CEDAR-IIコードによるPCMI評価の主要解析条件-----	25
第3.1表	AST鋼炉心(63年度設計大型炉レファレンス炉心)の仕様-----	26
第3.2表	AST鋼製燃料ピンについての確定論的評価の結果(通常運転時、寿命末期)--	26
第3.3表	AST鋼製燃料ピンについての基準および感度解析の詳細 (通常運転時、寿命末期、プレナム容積45cc)-----	27
第3.4表	AST鋼製燃料ピンについての確定論的評価の結果 (通常運転+異常な過渡変化時、寿命末期、プレナム容積45cc)-----	28
第3.5表	AST鋼製燃料ピンについての原型炉手法による評価の結果(通常運転時)-----	28
第3.6表	ODS鋼炉心(63年度設計実用化プラント炉心)の仕様-----	29
第3.7表	ODS鋼製燃料ピンについての確定論的評価の結果(通常運転時、寿命末期)--	29
第3.8表	ODS鋼製燃料ピンについての基準および感度解析の詳細 (通常運転時、寿命末期、プレナム容積70cc)-----	30
第4.1表	AST鋼炉心における燃料仕様等の確率密度関数-----	31
第4.2表	AST鋼製燃料ピンについての確率論的評価の結果(通常運転時、寿命末期)--	31
第4.3表	AST鋼製燃料ピンについての確率論的評価の結果 (通常運転+異常な過渡変化時、寿命末期、ガスプレナム容積:45cc)-----	31
第5.1表	AST鋼ピン被覆管外面温度履歴および高速中性子束分布(PCMI評価用)-----	32
第5.2表	ODS鋼ピン被覆管外面温度履歴および高速中性子束分布(PCMI評価用)-----	32
第5.3表	EBR-IIにおけるFFTF用高性能設計燃料ピンのRTCB試験の概要-----	33
第5.4表	RTCB試験における破損原因に対する補足説明-----	34

図 リ ス ト

第3.1図	AST鋼炉心における通常運転時ピーク線出力(公称値)の履歴-----	35
第3.2図	AST鋼炉心における通常運転時被覆管肉厚中心ホットスポット温度の履歴--	35
第3.3図	AST鋼炉心における寿命中平均出力(通常運転時)軸方向相対分布-----	35
第3.4図	AST鋼炉心における外部電源喪失以降の被覆管肉厚中心温度-----	36
第3.5図	ODS鋼炉心における通常運転時ピーク線出力(公称値)の履歴-----	37
第3.6図	ODS鋼炉心における通常運転時被覆管肉厚中心ホットスポット温度の履歴--	37
第3.7図	ODS鋼炉心における寿命中平均出力(通常運転時)軸方向相対分布-----	37
第4.1図	寿命末期の炉心上端高さにおける通常運転時被覆管肉厚中心温度-----	38
第4.2図	寿命末期の炉心部平均燃焼度-----	38
第4.3図	寿命末期の炉心上端高さにおける被覆管内面腐食量-----	39
第4.4図	寿命末期の炉心上端高さにおける被覆管外面腐食量-----	39
第4.5図	寿命末期の被覆管内圧 (プレナム容積: 45 cc)-----	40
第4.6図	寿命初期/末期の被覆管肉厚-----	40
第4.7図	寿命末期の被覆管周方向応力 (プレナム容積: 45 cc)-----	41
第4.8図	通常運転時の寿命末期CDF(S_t ベース) (プレナム容積: 45 cc)-----	41
第4.9図	過渡変化時(標準ケース)のCDF(S_t ベース)増分-----	42
第4.10図	通常運転+過渡変化時のCDF(S_t ベース)-----	42
第4.11図	確定論的評価にて得られる応力値の信頼度-----	43
第4.12図	確定論的評価にて得られるCDFの信頼度-----	43
第4.13図	確定論的評価にて得られる応力値の信頼度(見直し後)-----	44
第4.14図	確定論的評価にて得られるCDFの信頼度(見直し後)-----	44
第4.15図	寿命末期炉心上端高さにおける通常運転時被覆管肉厚中心温度(見直し後)-	45
第4.16図	寿命末期の炉心上端高さにおける被覆管外面腐食量(見直し後)-----	45
第5.1図	AST鋼炉心における寿命中平均出力(通常運転時)軸方向相対分布-----	46
第5.2図	AST鋼炉心における被覆管肉厚中心応力解析結果-----	46
第5.3図	AST鋼炉心における被覆管応力解析結果-----	47
第5.4図	AST鋼炉心におけるCDF解析結果-----	47

第5.5図	AST鋼炉心における内圧解析結果-----	47
第5.6図	ODS鋼炉心における寿命中平均出力(通常運転時)軸方向相対分布-----	48
第5.7図	ODS鋼炉心における被覆管肉厚中心応力解析結果-----	48
第5.8図	ODS鋼炉心における被覆管応力解析結果-----	49
第5.9図	ODS鋼炉心におけるCDF解析結果-----	49
第5.10図	ODS鋼炉心における内圧解析結果-----	49
第5.11図	EBR-IIにおけるFFTF用高性能設計燃料ピンのRTCB試験の結果と Phenixにおけるドライバー燃料ピンの照射実績-----	50

第1章 概要

63年度の高速増殖大型炉設計研究において、1990年代に着工可能な技術レベルを想定した100万kWeレファレンス・プラント⁷⁾、および2005年頃着工を想定した150万kWe実用化プラント⁸⁾の概念が検討された。燃料被覆管材として、レファレンス・プラントでは改良オーステナイト鋼(AST鋼)を、また実用化プラントでは酸化物分散強化型フェライト鋼(ODS鋼)の採用を前提としている。

本研究では、これらのプラントにおける炉心設計結果(主に、核計算結果)をベースとして、燃料設計手法の合理化に係わる検討を行った。本研究の第一の目的は、ガスプレナム必要有効容積最小値を合理的に設定するための評価手法を提供することである。プレナム容積の削減(すなわち、ガスプレナム部の短尺化)は、高燃焼度化および出口温度高温化を指向する上で重要な課題である。第二の目的は、過大なベレット・被覆管間の機械的相互作用(PCMI)が発生しないような燃料スミア密度許容値(最大値)の評価手法を提供することである。炉心特性上は燃料体積率を大きくすることが望ましく、被覆管のPCMI破損が生じない範囲で、適切なスミア密度を選定することは重要な課題である。

第2章では、従来の評価手法をレビューし、新しい手法の必要性について述べるとともに、新手法を提案した。新手法は確定論的(決定論的)手法であり、ガス圧応力評価手法とPCMI圧応力評価手法からなる。第1ステップにおいて、ガス圧に起因する被覆管応力とクリープ損傷和(CDF)を評価し、一次一般膜応力に関する荷重制限基準を満足するガスプレナム有効容積最小値を求める。次に、第2ステップにおいて、ガス圧だけではなくPCMI圧も考慮した被覆管応力とCDFを評価し、一次+二次応力周方向成分に対する荷重制限基準を満足する燃料スミア密度最大値を求める手法である。

第3章では、ガス圧応力の確定論的評価手法をレファレンス・プラントおよび実用化プラントの燃料ピンに適用した。レファレンス・プラントについては、原子炉運転状態として、通常運転状態だけでなく、異常な過渡変化状態(具体的には、外部電源喪失事象)も評価範囲とした。しかし、実用化プラントについては、通常運転状態だけを評価対象とした。AST鋼は「もんじゅ」材であるSUS316相当鋼(改良316鋼)と似通った材料であることから、過渡変化時のCDFはSUS316相当鋼の急速加熱バースト試験式にて概略評価可能であることに対し、ODS鋼の過渡時クリープ強度特性が現状把握されていないためである。また、第3章では、「もんじゅ」

手法にて求まるガスプレナム必要有効容積最小値との比較を行い、新手法を適用することで、プレナム容積の大幅削減が可能となることを示した。

第4章では、モンテカルロ手法を用いて、レファレンス・プラントの燃料ピンにおけるガス圧応力を確率論的に評価し、第3章で求めたガスプレナム必要有効容積最小値の妥当性を確認するとともに、第3章で求めた被覆管応力上限値およびCDF上限値の信頼度を評価することによって、ガス圧応力の確定論的評価手法の合理性を確認した。この際、モンテカルロ計算コードシステムHOPE-MCR⁹⁾を用いた。尚、ODS鋼については、開発が開始されて間が無いため、材料強度のばらつきを考慮した確率論的評価を実施することには現状無理があるため、実用化プラントの燃料ピンは確率論的評価の対象外とした。

第5章では、PCMI圧応力の確定論的評価手法をレファレンス・プラントおよび実用化プラントの燃料ピンに適用し、63年度設計の燃料スミア密度仕様(約88%T.D.)の妥当性を検討した。この際、燃料挙動解析コードCEDAR-II¹²⁾を用いた。PCMIは線出力の時間的変化に敏感であるため、本来ならば、制御棒の引抜履歴を考慮した核特性3次元計算結果に基づき、軸方向出力分布の変化を考慮した解析条件を設定する必要がある。しかし、本研究では、詳細な核計算が実施されていないことから、軸方向出力分布の変化は考慮していない。また、同様の理由にて、通常運転状態だけを評価対象とした。このため、第5章では、照射実績データベースでの燃料スミア密度の検討も実施し、解析評価を補うものとした。

本研究において、ガス圧応力の確定論的評価手法を組込んだ解析コードHOPE (A computing-code for calculations of the upper limits of the hoop stress and cumulative damage fraction due to the fission gas pressure in the fuel cladding) を作成したが、本コードのマニュアルを付録として収録した。

第2章. 評価手法

2.1 従来評価手法のレビュー

(1) 「もんじゅ」設計における評価手法¹⁾⁻²⁾

「もんじゅ」設計においては、燃料スミア密度が80%T.D.と低いので、PCMI (Pellet-Clad Mechanical Interaction)の寄与は小さいと推定されている。それ故、被覆管周方向膜応力としては、ガス圧に起因する周方向応力だけを考慮している。

ガス圧に起因する被覆管周方向応力は、応力が高めとなる側に種々の不確かさを考慮(たとえば、被覆管肉厚として公差内下限値を、また燃焼度、FPガス放出率、内外面腐食量として上限値を採用)することで、評価されている。応力評価値 σ_0 は設計応力強さ S_m^* を十分下回っており、短期荷重制限はガスプレナム容積の決定因子となっていない。

ガスプレナム容積の決定因子は長期荷重制限になっている。設計応力強さ $S_t (=0.8 \times S_R)$ ベースでのCDF (cumulative damage fraction)は、上記の応力値 σ_0 に基づくとともに、クリープ破断強度式として下限式、またクリープ強度評価用温度としてホットスポット温度を使用して評価されており、このCDFが1未満となるようにガスプレナム容積が決定されている。

このガス圧に起因する被覆管周方向応力とCDFの評価手法は、保守的な条件を重ね合わせたもので、合理化の余地がある³⁾。また、実証炉以降の設計においては、高線出力化や高燃焼度化の方向にあるので、PCMIの考慮が必要になると予測される。これらの理由のため、実証炉以降の設計においては、新たな評価手法が必要である。

尚、「もんじゅ」設計では、SUS316相当鋼製被覆管を使用していることから、短期荷重制限はガスプレナム容積の決定因子とならず、長期荷重制限が決定因子となっているのであり、実証炉以降の設計においては、被覆管材が異なるので、必ずしも同様とは限らないことに留意する必要がある。

(2) PCMIを考慮した評価手法の例⁴⁾

挙動解析コードCEDAR-IIコードにて、ガス圧だけではなくPCMI圧も考慮することにより、設計応力強さ $S_t (=0.8 \times S_R)$ ベースでのCDFを評価し、この評価値が1以下を満足するように、プレナム容積を設定する手法が提案されている。以下に、この評価手法の概要を示す。

① まず、線出力および被覆管温度として、不確かさを考慮した上限値を用い、また環境

効果強度劣化係数として0.7を用いることで、CDF基準値 CDF_{ref} をCEDAR-IIコードで評価する。尚、これら上限値は、工学的安全係数のうち、乗算項だけを考慮した値としている。また、0.7は破損ピンデータに基づき決定されている。

② 次に、第2.1表に示した統計処理対象誤差因子 i について、感度解析を実施し、 CDF_i を求め、倍率 $a_i = CDF_i / CDF_{ref}$ を評価する。本式を書き直すと、 $\ln a_i = \ln CDF_i - \ln CDF_{ref}$ であるから、実質的には誤差因子 i に起因するCDF対数値の不確かさ巾($\ln a_i$)を評価していると云える。

③ 最後に、CDF上限値 CDF_{up} を、次式にて算出する。

$$CDF_{up} = CDF_{ref} \times \exp \{ \{\sum_i (\ln a_i)^2\}^{1/2} \}$$

本式は次式と等価であり、実質的にはCDF対数値の上限値を評価して、その結果からCDF上限値を求めていると云える。

$$\ln CDF_{up} = \ln CDF_{ref} + \{\sum_i (\ln a_i)^2\}^{1/2}$$

本評価手法は、ガス圧だけではなくPCMI圧も考慮するものであるが、以下のような理由で、採用しないものとした。

- ① 本来、統計処理が適用できるのは、誤差因子が互いに独立な場合である。第2.1表のコメント欄に示したような相関性があるため、厳密に考えれば、統計処理は不適當である。
- ② 統計処理が適用できるのは、誤差因子に起因する不確かさ巾が小さい場合である。第2.2表に示した評価結果の一例から分かるように、 $\ln a_i = \ln CDF_i - \ln CDF_{ref}$ は、基準値(-4.22)と比較して微量とは云い難いこと、また $\ln CDF_{up}$ の値と $\ln CDF_{ref}$ の値との食い違いが大きいことで、統計処理して良いのか疑問である。
- ③ 求まるCDF上限値の信頼度(どの程度保守的であるか)が不明である。
- ④ ガス圧による応力は被覆管の変形(外径増加)によって緩和されない荷重制御型応力であることに對し、PCMI圧による応力は緩和される変位制御型応力と見なし得るとの考え方がある。本評価手法では、この違いについての配慮がされない。
- ⑤ 被覆管応力上限値が評価対象外なので、短期荷重制限を満足しているかの判定ができない。

2.2 新たな評価手法の提案

本手法は、第1ステップとして実施の、ガス圧に起因する被覆管応力を評価し、この応力に関する荷重制限を満足するようにガスプレナム容積を設定するための手法と、第2ステップとして実施の、ガス圧とPCMI圧に起因する被覆管応力を評価し、これらの応力に関する荷重制限を満足するように燃料スミア密度を設定するという手法からなる。以下に、各ステップにおける荷重制限条件と評価手法を示す。

(1) ガス圧に起因する被覆管応力の制限条件と評価手法

a) 制限条件

下記の「もんじゅ」燃料設計における一次一般膜応力 P_m (実質的には、ガス圧に起因する応力)に対する制限条件を踏襲する。適用運転状態は、通常運転時と異常な過渡変化時である。

① 短期荷重制限

$$(P_m) \leq S_m^* \text{ ----- (2.1)}$$

ここで、応力強さ (P_m) は、実質的にはガス圧に起因する被覆管周方向応力である。炉内強度劣化を考慮した設計応力強さ S_m^* の定義は、 $S_m^* = \min\{1/2S_u^*, 3/4S_y^*\}$ であり、肉厚中心温度に対応する強度が用いられる。

② 長期荷重制限

$$\Sigma(t_i/t_{mi}) \leq B \text{ ----- (2.2)}$$

ここで、 t_{mi} は、持続時間 t_i における応力強さ $(P_m)_i$ 、実質的にガス圧に起因する周方向応力に対するクリープ破断寿命であり、炉内強度劣化を考慮した設計クリープ破断応力強さ S_R^* ベースではなく、炉内強度劣化を考慮した設計応力強さ $S_t^* = 0.8 \times S_R^*$ ベースで(すなわち、 $1/0.8$ 倍だけ高めの応力を用いて)計算される。これは、クリープ破断を防止するだけでなく、クリープに起因する過大な変形を防止しようという考え方に基づいている。尚、 S_t^* としては、肉厚中心温度に対応する強度が用いられる。BはCDFの制限値であり、本来は1で良いが、指定のある場合は1より小さい値にするという規定になっている。

これらの制限条件が満足されるかどうかは、寿命末期(ガス圧に起因する周方向応力が最大となる時期)、炉心上端高さ(被覆管が最高温度となるので、強度が最低となる部位)において判定しておけば十分である。

b) 被覆管上限応力の評価手法

燃料中心上限温度評価手法⁹⁾と同様に、基準解析と感度解析に基づく手法にて、被覆管上限応力を評価するものとする。基準解析と感度解析の主要条件を第2.3表に示す。本来、ペレット仕様はピン内ではばらつくが、スタック長さ全長について一定として簡易的に取り扱うものとした。この方が、ペレット仕様誤差に起因するFPガス生成量の不確かさ評価の点で、保守的である。感度解析対象誤差因子としては、互いに独立と考えられる6因子(被覆管肉厚製造誤差、炉心燃料ペレット外径製造誤差、炉心部スタック長さ製造誤差、内面腐食量予測式誤差、外面腐食量予測式誤差、FPガス放出率予測式誤差)を選定した。互いに独立であるため、誤差伝播則が適用可能であり、被覆管周方向応力上限値は、基準解析にて得られる応力基準値に、各感度解析にて得られる応力値の基準値からの増分の平方和の平方根を加えた値とすることで求まる。

ペレット密度、Pu富化度、および外径は正規分布的であり、製造誤差巾が 3σ にはほぼ相当するとの製造実績があるので、これらの上限値としては必ずしも公差内上限値をとる必要はなく、 2σ 上限値を採用するという選択肢もあり得る。しかし、第3章での検討結果から、公差内上限値を採用することに最終的に決定した。

以下、解析手法の概要を列挙する。

- 燃料設計と熱設計は、ノミナル温度ではなくホットスポット(HS)温度で取り合うものなので、HS温度 T_h を出発点として炉心上端部被覆管肉厚中心温度 T を設定する。
- スタック長さが上限値の条件である感度解析3においては、 T として T_h をそのまま用いるが、その他の解析では、スタック長さがノミナル条件なので、スタック長さ誤差に起因する温度不確かさを除外した低めの温度

$$T = (T_h - T_{in}) \times l_n / l_{up} + T_{in}$$

を用いることとする。ここで、 l_n および l_{up} は、それぞれ炉心部スタック長さの公称値および上限値であり、 T_{in} は冷却材入口温度である。

- スタック長さ誤差は、FPガス生成量誤差の一因としても考慮する。
- 熱出力誤差、核計算誤差、ペレット密度誤差、ペレット外径誤差、およびPu富化度誤差を補正(注:解析ケースにより考慮すべき誤差の組合せは異なる。)したピーク線出力上限値を求め、この上限値と相対出力軸方向分布とから、軸方向各位置での局所線出力上限値

を求めるものとする。

○ 線出力上限値から求まる燃焼度を用いて、FPガス生成量を求める。

c) CDF上限値の評価手法

上記手法にて求まる被覆管上限応力の履歴を用いるものとし、クリープ強度式は上限式、被覆管肉厚中心温度履歴はホットスポット条件としたときのCDF計算値を、CDF上限値とする。

(2) ガス圧およびPCMI圧に起因する被覆管応力の制限条件と、評価手法

a) 制限条件

「もんじゅ」燃料設計では、PCMI応力を計上していないので、PCMI応力に対する制限条件を新たに策定する必要がある。PCMI圧に起因する周方向応力は、膜方向成分が支配的である点において、ガス圧に起因する応力と類似性があり、ガス圧による周方向応力との重畳作用にて、被覆管の引張り破断やクリープ破断の生じることが懸念される。したがって、PCMI応力に対する制限条件は、周方向応力成分に対して規定するのが妥当と考えられる。また、PCMI応力単独ではなく、ガス圧応力も含めた周方向応力に対しての制限条件を設定するのが妥当と考えられる。

PCMI応力は、ガス圧による応力(一次膜応力)と異なり、被覆管のクリープ変形によって緩和される応力(二次膜応力)であり、PCMI応力を評価する場合、クリープ緩和を考慮することが不可欠である。ここで、PCMI応力は、PCMI圧による被覆管のクリープ変形だけではなく、ガス圧によるクリープ変形によっても緩和されることに留意する必要がある。すなわち、PCMI応力はガス圧による応力と同時に解析評価する必要がある。現状、この解析評価に適用できるコードとしては、CEDAR-IIコードが最適と考えられる。

CEDAR-IIコードでは、被覆管の肉厚方向の熱膨張差やスエリング差による応力(二次曲げ応力)もひっくるめて評価されるので、膜応力成分だけではなく、若干ではあるが、曲げ応力成分も現れる。このような訳で、以下に提案する制限基準(通常運転時と異常な過渡変化時において満足されるべき制限基準)は、厳密にはガス圧とPCMI圧に起因する応力だけではなく、熱膨張差、およびスエリング差に起因する応力も考慮した周方向応力に対して適用する。

① 短期荷重制限

$$\sigma_{\theta} \leq S_y^* \text{ ----- (2.3)}$$

ここで、 σ_{θ} は、CEDAR-IIコードで求まる周方向応力である。二次応力も含めた制限であるので、制限値は S_m^* ではなく、設計降伏応力 S_y^* とする。

② 長期荷重制限

$$\Sigma(t_i / t_{mi}) \leq B \text{ ----- (2.4)}$$

ここで、 t_{mi} は、持続時間 t_i における周方向応力強さ σ_{θ} に対するクリープ破断寿命である。二次応力も含めた制限であるので、クリープ破断寿命は、設計余裕0.8を考慮しないで、設計クリープ破断応力強さ S_R^* ベースで計算する。BはCDFの制限値であり、1以下の値とする。

PCMI応力の軸方向変化が大きいので、炉心上端高さ(被覆管最高温度部)だけではなく、炉心部軸方向全域に対して、制限条件が満足されるかを判定する必要があるとともに、PCMI応力が最大となる時期は必ずしも寿命末期とは限らないので、短期荷重制限に関しては寿命中を通じた判定が必要である点に留意すべきである。さらにまた、肉厚方向全域に対して制限条件が満足されるかを確認する必要がある、この際材料強度(設計降伏応力および設計クリープ破断応力強さ)として、肉厚方向各位置での温度に対応した値を使用する必要がある。

b) 被覆管応力およびCDFの評価手法

第1ステップの評価で得られた、炉心上端高さ・寿命末期でのガス圧に起因する被覆管周方向応力上限値が再現されるように、CEDAR-IIコードの入力データを調整する。具体的には、CEDAR-IIコードで得られる炉心上端高さ・寿命末期・肉厚中心での被覆管周方向応力(ガス圧とPCMI圧による応力) σ_{θ} から、ガス圧だけによる周方向応力 $P_{m\theta}$ を式(2.5)にて算出し、この値が第一ステップでの周方向応力上限値に一致するように、ガスプレナム有効容積を設定する。

$$P_{m\theta} = \sigma_{\theta} \times (\text{プレナムガス圧}) / (\text{炉心上端高さでの被覆管内圧}) \text{ ----- (2.5)}$$

その他の主要な解析条件は、第2.4表に示した。PCMI圧に最も影響するのは、燃料ペレット密度なので、これについては公差内上限値を使用する。また、CDFが保守側となるよう、被覆管温度は上限値(ホットスポット温度)を採用する。

第3章 ガス圧応力評価手法の適用

3.1 改良オーステナイト鋼製燃料ピンへの適用

(1) 適用条件

検討対象とした改良オーステナイト鋼炉心(63年度設計大型炉レファレンス炉心)⁷⁾の仕様を第3.1表に、また、その炉心における最大線出力ピンの炉内条件を第3.1図～第3.4図に示す。第3.1表に示したように、下部ガスプレナム容積として、35、40、および45 ccの3通りを考えるものとした。

第3.1図の通常運転時ピーク線出力(公称値)履歴は、寿命中の最大線出力が430W/cmになるように、核計算(2次元)結果を換算したものである。第3.2図の実線で示した通常運転時被覆管温度(ホットスポット値)は、集合体出力計算結果をもとに、寿命中の最高温度が700°Cになるように設定したものである。第3.3図は、通常運転時の線出力軸方向分布の寿命中平均値(相対値)を示すが、炉心上端高さでの被覆管周方向応力とCDFを評価するという目的から、炉心上端部の軸方向メッシュ巾を5cmと短くして、上端部での計算精度向上を図っている。

第3.4図は、異常な過渡変化(具体的には外部電源喪失)時の被覆管温度履歴を示すが、温度条件の観点で保守性を確保するため、過渡変化直前の被覆管温度は寿命中の最高温度(ホットスポット値)とした。3通りの温度履歴を考えるものとしたが、いずれも「もんじゅ」より厳しい条件とした。被覆管応力条件の観点で保守性を確保するため、過渡変化は寿命末期に生じるとし、一回または2回起こるものとした。過渡変化時のクリープ強度式として、急速加熱バースト試験に基づく式、または通常運転時の式(内圧クリープ試験に基づくクリープ強度式)を用いるものとした。尚、下部プレナム型燃料ピンなので、異常な過渡変化の被覆管応力は、通常運転時の応力に等しいとした。

(2) 適用結果

通常運転時の応力上限値とCDF上限値の評価結果と合否判定結果を第3.2表に示し、その応力上限値を求めるために実施した基準解析および感度解析の詳細を 下部ガスプレナム容積が45ccの場合について、第3.3表に示す。また、プレナム容積が45ccの場合について、通常運転+異常な過渡変化時の評価結果と合否判定結果を第3.4表に示す。

燃料ペレット仕様(プルトニウム富化度、外径、密度)の誤差巾として、 2σ および 3σ を採用し

た場合の両方について評価した。その結果、考慮すべき誤差巾を 2σ に切り詰めたとしても、効果が小さいことが分かった。したがって、考慮すべき誤差巾として、 3σ の誤差巾(製造公差巾)を採用するものとした。

設計成立性に関しては、以下の結論が得られた。

- 通常運転時において、ガスプレナム容積が40cc以下では成立しないが、45cc(下部ガスプレナム長さで約1mに相当)とするならば成立する。
- 過渡変化時におけるCDFの増分は小さく、ガスプレナム容積を45ccとするならば、通常運転+異常な過渡変化時においても、長期荷重制限は満足される。
- 原型炉における S_{m^*} の定義

$$S_{m^*} = \text{Min}\{(3/4) \cdot S_{y^*}, (1/2) \cdot S_{u^*}\} = (1/2) \cdot S_{u^*}$$

を踏襲するならば、ガスプレナム容積として45ccを採用しても、短期荷重制限が満足されないため、過渡変化時には成立しない。

- しかし、 S_{m^*} が実質的に、 $S_{m^*} = (3/4) \cdot S_{y^*}$ となるように、たとえば

$$S_{m^*} = \text{Min}\{(3/4) \cdot S_{y^*}, (2/3) \cdot S_{u^*}\}$$

のように変更した定義とするならば、過渡変化時においても成立する。本来、ガス圧応力に対する短期荷重制限は、ガス圧応力以外の応力も考慮したときに、被覆管の健全性が保たれる目安を与えるものであり、絶対的な制限ではない。すなわち、評価手法の合理化等によって、ガス圧応力以外の応力が低減できることを前提とするならば、この S_{m^*} の定義変更は実現可能と考えられる。

原型炉の保守的手法で評価した場合、第3.5表に示したように、ガスプレナム容積は約70ccとなる。この結果との比較から、新しい評価手法の採用と S_{m^*} 定義式の変更によって、プレナム容積は、 $(70 - 45)/70 \times 100 = 35\%$ 程度削減できることが分かる。

3.2 ODS鋼製燃料ピンへの適用

(1) 適用条件

検討対象としたODS鋼炉心(63年度設計実用化プラント炉心)⁹⁾の仕様を第3.6表に、また、その炉心における最大線出力ピンの炉内条件を第3.5図~第3.8図に示す。第3.6表に示したように、下部ガスプレナム容積として、60および70 ccの2通りを考えるものとした。

第3.5図の通常運転時ピーク線出力(公称値)履歴は、寿命中の最大線出力が470W/cmになるように、核計算(2次元)結果を換算したものである。第3.6図の実線で示した通常運転時被覆管温度(ホットスポット値)は、集合体出力計算結果をもとに、寿命中の最高温度が700°Cになるように設定したものである。第3.7図は、通常運転時の線出力軸方向分布の寿命中平均値(相対値)を示すが、炉心上端高さでの被覆管周方向応力とCDFを評価するという目的から、炉心上端部の軸方向メッシュ巾を5cmと短くしている。

(2) 適用結果

通常運転時の応力上限値とCDF上限値の評価結果と合否判定結果を第3.7表に示し、その応力上限値を求めるために実施した基準解析および感度解析の詳細を、下部ガスプレナム容積が70ccの場合について、第3.8表に示す。

燃料ペレット仕様(プルトニウム富化度、外径、密度)の誤差巾として、2 σ および3 σ を採用した場合の両方について評価した。応力値やCDF値に関する両者の相違は、AST鋼炉心におけるより若干大きいものの、3.1節におけると同様、考慮すべき誤差巾を2 σ に切り詰めたとしても、効果が小さいことが分かり、考慮すべき誤差巾として3 σ の誤差巾(製造公差巾)を採用することで十分なことを確認した。

設計成立性に関しては、以下の結論が得られた。

- 通常運転時において、ガスプレナム容積が60cc以下では成立しないが、70cc(下部ガスプレナム長さで約1.5mに相当)とするならば成立する。
- 原型炉におけるSm*の定義を踏襲するならば、ガスプレナム容積として70ccを採用しても、過渡変化時には成立しないと推定される。したがって、ODS鋼についてもSm*の定義の合理化が必要になると考えられる。

第4章 ガス圧応力評価手法妥当性の評価

4.1 改良オーステナイト鋼製燃料ピンの確率論的評価

検討対象としたAST鋼炉心は、63年度設計大型炉レファレンス炉心⁷⁾である。第3.1節におけると同様、ガスプレナム有効容積を35cc、40cc、45ccの3通りとし、最大線出力燃料ピンを解析対象として想定し、モンテカルロ計算コードシステムHOPE-MCR[®]を用いて、ガス圧に起因する燃料被覆管応力およびCDFの確率分布を解析評価した。但し、過渡変化時については、プレナム有効容積が45ccの場合に限定した。

モンテカルロ計算の試行回数は30万回とした(炉心内の全燃料ピン本数が約10万本なので、これを越える回数とした)。その際に用いた確率密度関数の一部を第4.1表に示す。「常陽」における被覆管製造実績(製造ロット内での平均値が公称値からずれるのが一般的であること)を考慮して、被覆管肉厚として薄肉側のロットを想定した確率密度関数を用いている。クリープ破断強度、内外面腐食量、FPガス放出率についても確率密度関数を用いている[®]が、ここではこれらの分布型についての記述を割愛した。尚、過渡変化時において、クリープ強度の不確かさを考慮するためのサンプリングは改めて実施しないものとした。すなわち、通常運転時と過渡変化時の強度間に一対一の相関を持たせる(通常運転時に弱めならば、過渡時も弱めで、通常運転時に強めならば、過渡時も強めと考える)こととした。

ガス圧に起因する燃料被覆管応力およびCDFの確率分布の計算手法は、コードマニュアル[®]に詳細を示しているので、ここでは割愛した。以下は、各種の中間計算結果について列挙したものである。

- ・ 通常運転時の被覆管肉厚中心温度の確率分布は、入力で与えるホットスポット温度履歴を基準とし、熱出力誤差、核計算誤差、および炉心スタック長さの各サンプリング値に応じて(低めに)補正することで算出している。その他の不確かさ因子(集合体流量誤差等)については補正してないので、得られる確率分布(cf. 第4.1図)は高温側に偏った保守的分布になっていることに留意する必要がある。
- ・ ペレット密度、外径、およびPu富化度は、炉心スタック全長に亘って等しいものとしているので、炉心部平均燃焼度の分布(cf. 第4.2図)は、ばらつきの大きい保守的分布になっていることに留意する必要がある。尚、軸方向出力ピーキング係数は1.205なので、ペレット

最高燃焼度の平均値および最大値はそれぞれ14.8万MWD/tおよび16.5万MWD/tである。

- 内面腐食式として、温度依存性がなく、燃焼度に関して飽和する式を用いているので、内面腐食量の分布(cf. 第4.3図)はほぼ一様分布になっている。
- 外面腐食式として、被覆管温度が指数項として含まれている式を用いているので、外面腐食量の分布(cf. 第4.4図)は高腐食量側に裾の広がった分布となっている。
- FPガス生成量が炉心部平均燃焼度にはほぼ比例することで、FPガス放出率の不確かさを考慮しても、被覆管内圧の分布(cf. 第4.5図)は、炉心部平均燃焼度の分布とほぼ相似形となっている。
- 被覆管肉厚の分布(cf. 第4.6図)は、寿命初期において0.42mm以下をカットオフした分布であるが、外面腐食量の分布が高腐食量側に裾の広がっていることで、寿命末期には薄い側に裾の広がった分布となっている。
- ペレット密度はヒストグラムとして示していないが、密度はペレット外径サンプリング値との相関を持たせたサンプリングとしたので、密度サンプリング結果の標準偏差は設定した標準偏差0.667%T.D.より大きい0.757%T.D.となっている。

通常運転時における被覆管周方向応力とCDFの確率分布評価結果を、プレナム容積が45ccの場合について、第4.7図と第4.8図に示した。寿命末期において、被覆管肉厚が薄い側に裾の広がった分布となっていることで、周方向応力は高い側に裾の広がった分布となっている。CDF(S_t ベース)は、ほぼ対数正規分布に従っているが、クリープ強度の確率密度関数として対数正規分布を用いたことに起因している。第4.9図に、標準ケース(ピーク温度:750°C、過渡想定回数:1回、クリープ強度式:急加バースト式)について、過渡変化時におけるCDF増分を示した。また、第4.10図に、通常運転+過渡変化時のCDFを、通常運転時のCDFと比較して示した。これらの図から明らかなように、CDFへの過渡時の寄与分は小さい。

以下、制限条件を越える燃料ピンの期待数が1本未満か1本以上かで、設計成立性の有無を判定するものとする。通常運転時において制限条件を越える確率を、プレナム容積が3通りの場合について、第4.2表に示した。プレナム容積が40ccの場合、CDFが1を越える確率は0.016%であり、炉内全燃料ピン(約10万本)を最大線出力ピンとみなす保守的判断では、長期荷重制限を越える燃料ピンの期待数は約16本となる。燃料ピン毎の炉内使用条件の違いを考慮した全炉心についての確率分布評価を実施するならば、この期待数は減少するであろうが、1本未満にな

るほどの効果は期待し難い。すなわち、40cc以下のプレナム容積では、設計成立性がないと推定される。45ccに増加し、かつ新 Sm^* を採用するならば、いずれの制限条件を越える確率も零(注:正確には、0.0003%未満であり、制限条件を越えるピンの期待数で云えば、0.3本未満に相当する。)となるので、通常運転時だけに着目するならば、設計成立性がある。

プレナム容積が45ccの時、過渡変化時を考慮した場合、第4.3表に示したように、いずれのケースでも、長期荷重制限を越える確率は零であるものの、短期荷重制限を越える確率は、新 Sm^* を採用した場合でも零とはならず、前提とした設計成立性判定の考え方では、設計成立性がないことになる。

3.1節と本節での検討結果を相互比較すると、以下のことが分かる。

- 。 プレナム有効容積を35ccまたは40ccとした場合、確率論的評価でも設計成立性がないとの結果が得られ、3.1節での確定論的評価結果と整合性がある。
- 。 45ccとした場合、通常運転状態に限定するならば、確率論的評価でも設計成立性があるとの結果が得られ、3.1節での確定論的評価結果と整合性がある。

しかし、45ccとした場合で、異常な過渡変化時も考慮するならば、確率論的評価では長期荷重制限が満足されるが、短期荷重制限を満足しないとの結果が得られ、3.1節での確定論的評価でのいずれも満足するとの結果と整合性がない。この不整合は、短期荷重に対する制限条件を、確率論的評価用に変更する(具体的には、 Sm^* を確率密度関数とすることを意味する)ならば、解消されると考えられる。なぜならば、長期荷重制限を満足する確率は、クリープ強度の不確かさを考慮して評価されることに対し、現状の短期荷重に対する制限条件では、引張り強度の不確かさが考慮されないためである。

4.2 被覆管応力およびCDF上限値の信頼度評価

第3章にて述べたように、燃料ペレット仕様に関して考慮すべき誤差中として、 3σ の誤差中(製造公差中)を採用するものとした。第4.11図および第4.12図に、 3σ の誤差中を考慮した確定論的評価(cf. 第3.1節)にて得られた被覆管周方向応力上限値(12.9 kg/mm^2)、通常運転時CDF上限値(0.56)、および異常な過渡変化時CDF上限値(0.0052)の信頼度評価結果を示した。それぞれ、約99.8%、99.99%、および約99.8%の信頼上限値に相当するとの結果が得られた。10万本程度の燃料ピンが炉内に装荷されることから、これら上限値が制限値に一致するとき、制限値を越えるピン期待本数が1本未満となるためには、上限値の信頼度としては99.999%以上あれば十分と云えるが、この信頼度には達していない。

このような訳で、HOPE-MCRコードにおける被覆管温度計算手法を若干変更し、確率論的評価を再度実施し、信頼度評価結果を見直すこととした。HOPE-MCRコードにおいて、通常運転時の被覆管肉厚中心温度 $T_{c,s}$ (単位:°C)は、次式で求めている。

$$T_{c,s} = (T_h - T_{in}) \times \{(1 + QT_s/100)/(1 + QT_{up}/100)\} \times \{(1 + QL_s/100) / (1 + QL_{up}/100)\} \times (L_s/L_{up}) + T_{in} \quad \dots\dots\dots (4-1)$$

ここで、 T_h : 炉心上端部被覆管肉厚中心ホットスポット温度 (°C)

T_{in} : 冷却材入口温度 (°C)

QT : 熱出力誤差 (%)

QL : 核計算誤差 (%)

L : 炉心燃料スタック軸長 (cm)

また、下付添字 s : サンプル値

up : 上限値

すなわち、被覆管肉厚中心ホットスポット温度を、熱出力誤差、核計算誤差、および炉心燃料スタック軸長誤差のサンプリング結果に対応する低めの温度に換算(確率分布に変換)している。これら3種類の誤差は、冷却材の入口温度からの上昇 ΔT_{Na} 、冷却材から被覆管外面までの温度上昇 ΔT_{film} 、被覆管壁内での温度上昇 ΔT_{clad} のいずれにも、同じ比率で寄与するので、式(4-1)のような簡単な関係が成立する。しかし、その他の誤差(集合体間流量配分誤差、流路断面積製作公差、ペレット製作公差、etc.)については、この関係式が成り立たないの

で、考慮しない保守側の取扱いとしている。

ところで、通常運転時の被覆管肉厚中心温度に対するグローバル・ホットスポットファクター(GHSF)は、「もんじゅ」の場合で約1.26であり、リファレンス・プラントや実用化プラントでのGHSFは、設計の合理化により低減される可能性があるため、ここでは1.2として検討する。3種類の誤差(熱出力誤差、核計算誤差、および炉心燃料スタック軸長誤差)だけを考慮して算出したGHSFは1.08(=1.05×1.02×1.005)なので、その他の誤差に起因する通常運転時温度誤差は10%程度(∵1.20÷1.08=1.11)となる。そこで、式(4-1)を

$$T_{c,s} = (T_h - T_{in}) \times \{(1 + QT_s/100)/(1 + QT_{up}/100)\} \times \{(1 + QL_s/100) / (1 + QL_{up}/100)\} \times \{(1 + F_s/100)/(1 + F_{up}/100)\} \times (L_s/L_{up}) + T_{in} \dots \dots \quad (4-2)$$

と変更し、その他の誤差の影響も考慮した評価を実施するものとした。F_sがその他の誤差を考慮するためのサンプリング値であり、一様分布型の確率密度関数に従うものと仮定した。上限値F_{up}は、上記の議論では、10%程度であるが、GHSFの低減が達成されない場合を想定し、15%とした場合についても評価した。

信頼度の再評価結果を第4.13図と第4.14図に示した。温度誤差として10%を追加考慮することで、通常運転時のCDF上限値の信頼度は99.999%以上となり、満足な結果が得られた。しかし、過渡変化時のCDF上限値の信頼度は約99.96%であり、再び不満足な結果が得られた。今回の検討は、過渡変化時のCDFの確率分布を算出する際、被覆管温度の過渡変化時履歴をホットスポット条件に固定したものであり、過渡変化時の温度不確かさを考慮した確率論的評価を今後実施するならば、過渡変化時のCDF上限値の信頼度についても、99.999%以上を満足する可能性がある。また、被覆管周方向応力上限値の信頼度は約99.98%であり、通常運転時温度誤差として15%を追加考慮した場合でも、約99.99%であり、満足な結果が得られなかった。ペレット仕様の軸方向変化を考慮した確率論的評価を今後実施することで、周方向応力上限値の信頼度についても、99.999%以上となる可能性がある。(材料強度のばらつきがより明確になった時点で、再検討を行う必要があるため、今回はこれ以上の進んだ検討は実施していない。)

参考として、第4.15図と第4.16図に、温度誤差として10%を追加考慮した場合の、被覆管肉厚中心温度と外面腐食量の確率分布計算結果を示した。それぞれ、第4.1図および第4.4図と比較して分かるように、いずれも低い側にシフトしている。

第5章 PCMI圧応力評価手法の適用

5.1 改良オーステナイト鋼製燃料ピンへの適用

(1) 適用条件

検討対象とした改良オーステナイト鋼炉心(63年度設計大型炉レファレンス炉心)⁷⁾の仕様は、既に第3.1表に示した。これらの仕様に対して、第2.2節や第2.4表に示した方針で、CEDAR-IIコードにおける解析条件を設定した。最大線出力ピンのピーク線出力履歴は、既に第3.1図に示した公称値とした。CEDAR-IIコードの軸方向メッシュ数の制限のため、軸方向出力分布はガス圧応力評価における分布(第3.2図)より粗い分布(第5.1図)とした。境界温度条件として被覆管外面ホットスポット温度を、また被覆管のスエリング/照射クリープを計算するために高速中性子束分布を用いているが、これらの条件は第5.1表に示した。尚、被覆管外面温度設定の際、炉心上端高さにおける被覆管肉厚中心温度が、第3.2図に示したホットスポット温度にほぼ一致するように留意した。

(2) 適用結果

各サイクル内では漸増し、サイクル間では低下する出力履歴なので、被覆管応力は各サイクル末期で極大となる。第5.2図に、各サイクル末期での被覆管肉厚中心周方向応力解析結果と、寿命中の S_y^* 最小値を示した。また、第5.3図に、第2サイクル末期(E02C)と第3サイクル末期(E03C)について、炉心上端高さおよび炉中心高さにおける周方向応力の肉厚方向分布を示した。軸方向および肉厚方向全域で、 S_y^* を下回っており、短期荷重制限は満足されている。尚、寿命末期、炉心上端高さにおいてPCMIは生じておらず、被覆管周方向応力はガス圧応力の確定論的評価にて得られた応力上限値 12.9 kg/mm^2 に、ほぼ一致している。参考として、第5.5図に、各サイクル末期での被覆管全内圧(ガス圧+PCMI圧)とガス圧を示した。

CDFが最大となる軸方向位置は、PCMIを考慮した場合においても、炉心上端高さであるとの結果が得られた。第5.4図に示したように、炉心上端高さでのCDF(S_t ベース)は内面で1を越えているが、CDF(S_R ベース)は肉厚方向全域で1を下回っており、長期荷重制限は満足されている。

以上の検討結果より、現状の燃料スミア密度(約88%T.D.)にて、少なくとも通常運転時には、荷重制限が満足されることが分かった。

5.2 ODS鋼製燃料ピンへの適用

(1) 適用条件

検討対象としたODS鋼炉心(63年度設計大型炉実用化炉心)⁹⁾の仕様は、既に第3.6表に示した。これらの仕様に対して、第2.2節や第2.4表に示した方針で、CEDAR-IIコードにおける解析条件を設定した。最大線出力ピンのピーク線出力履歴は、既に第3.5図に示した公称値とした。CEDAR-IIコードの軸方向メッシュ数の制限のため、軸方向出力分布はガス圧応力評価における分布(第3.7図)より粗い分布(第5.6図)とした。境界温度条件として被覆管外面ホットスポット温度を、また被覆管のスエリング/照射クリープを計算するために高速中性子束分布を用いているが、これらの条件は第5.2表に示した。尚、被覆管外面温度設定の際、炉心上端高さにおける被覆管肉厚中心温度が、第3.6図に示したホットスポット温度にほぼ一致するように留意した。

(2) 適用結果

各サイクル内では漸増し、サイクル間では低下する出力履歴なので、被覆管応力は各サイクル末期で極大となる。第5.7図に、各サイクル末期での被覆管肉厚中心周方向応力解析結果と、寿命中の S_y^* 最小値を示した。また、第5.8図に、第2サイクル末期(EO2C)と第3サイクル末期(EO3C)について、炉心上端高さと同炉中心高さにおける周方向応力の肉厚方向分布を示した。ODS鋼のスエリング速度が小さいので、AST鋼の場合と異なり、軸方向および肉厚方向全域でEO2CよりEO3Cにおいて応力が増加してはいるものの、 S_y^* を下回っており、短期荷重制限は満足されている。尚、寿命末期、炉心上端高さにおいてPCMIは生じておらず、被覆管周方向応力はガス圧応力の確定論的評価にて得られた応力上限値 12.6 kg/mm^2 に、ほぼ一致している。参考として、第5.10図に、各サイクル末期での被覆管全内圧(ガス圧+PCMI圧)とガス圧を示した。

CDFが最大となる軸方向位置は、PCMIを考慮した場合においても、炉心上端高さであるとの結果が得られた。第5.9図に示したように、炉心上端高さでのCDF(S_R ベース)は、肉厚方向全域で1を十分下回っており、長期荷重制限は満足されている。尚、CDF(S_t ベース)についても肉厚方向全域で1を下回っている。

以上の検討結果より、現状の燃料スミア密度(約88%T.D.)にて、少なくとも通常運転時には、荷重制限が満足されることが分かった。

5.3 照射実績に基づくスミア密度の検討

FFTF用標準設計燃料ピンのスミア密度と肉厚/ピン径比は、それぞれ85%TDおよび0.065である。スミア密度がより高く(86.7~92.3%TD)、また肉厚/ピン径比がより小さい(0.041~0.065) FFTF用高性能設計燃料ピンのRTCB(Run to cladding breach)試験⁹⁾がEBR-IIで実施されており、PIE(Post irradiation examination)にて破損原因が究明されている(cf. 第5.3表および第5.4表)。

このRTCB試験にて得られている、破損発生時のピーク燃焼度とスミア密度の関係を第5.11図に図示した。RTCB試験の結果だけではなく、Phenixにおけるドライバー燃料ピンの照射実績¹⁴⁾も、未破損であるが、合わせて示した。Phenix燃料ピンのピーク燃焼度は、文献に記載されていないので、記載されている燃料要素最高燃焼度の1.25倍と仮定(FFTFの炉心部高さは914mmであり、「もんじゅ」の930mmにほぼ等しいので、「もんじゅ」における軸方向ピーキング係数を採用)して算出した。これらのデータのうち、以下のような考え方で、破損原因が局所温度上昇であるデータ3点、および肉厚が0.25mmと極めて薄い被覆管のデータ2点を除外し、残り11点のデータの下限包絡直線を引くことで、達成可能ピーク燃焼度とスミア密度の関係を推定した。

- 耐スエリング特性の優れたAST鋼製またはODS鋼製被覆管材の採用を前提とするならば、耐スエリング性不足(BDI)に起因する局所温度上昇の発生を回避できる。(この時、PCMIの厳しくなることが予想されるが、Phenixの照射実績によると、耐スエリング性を高めた材料(316 Ti CW)を用いた場合、達成燃焼度が大幅に向上している。)
- 太径ピンの採用を前提とするならば、肉厚/ピン径比を大きくすることなく、厚肉化を図ることができるので、内外面腐食の影響が小さくなる。

リファレンス・プラントおよび実用化プラントにおけるピーク燃焼度は、それぞれ約15万MWd/tおよび約22万MWd/tなので、下限包絡直線を用いて許容燃料スミア密度を推定すると、それぞれ約89%T.D.および約87%T.D.となる。

第6章 結 言

6.1 成果のまとめ

- (1) ガスプレナム必要有効容積を合理的に設定するための確定論的評価手法(cf. 第2.2節)を提供した。63年度のレファレンス・プラントについて、「もんじゅ」での保守的手法と比較評価した結果、プレナム部長さが約35%短尺化される(cf. 第3.1節)ことを確認した。
- (2) 同手法にて、63年度のレファレンス・プラントおよび実用化プラントにおけるプレナム部長さを評価検討し、それぞれ約1m(cf. 第3.1節)および約1.5m(cf. 第3.2節)との結果を得た。
- (3) AST鋼は、「もんじゅ」材であるSUS316相当鋼と比べ、クリープ強度が大幅に改善されているものの、引張り強度が同程度であることより、異常な過渡変化時における短時間強度制限がプレナム容積の決定因子になるとの結果を得た。また、ODS鋼についても同様であるとの見通しを得た。そこで、設計応力強さ S_m の定義の変更案を提案した(cf. 第3章)。
- (4) レファレンス・プラントにおける燃料ピンについて、30万回のモンテカルロ試行計算を実施して、ガス圧に起因する被覆管周方向応力とCDFの確率分布を求めることによって、確定論的手法にて評価したガスプレナム部長さの妥当性を確認した(cf. 第4.1節)。
- (5) 確定論的手法にて求まる、ガス圧に起因する被覆管周方向応力上限値、通常運転時のCDF上限値、および異常な過渡変化時のCDF上限値の信頼度を評価し、それぞれ約99.98%、99.999%以上、および約99.96%であるとの結果を得た。また、より詳細な検討を実施するならば、いずれの上限値も99.999%以上(すなわち、上限値を越えるピン本数の期待値が1本以下)であることを示し得る見通しを得た。(cf. 第4.2節)。
- (6) 燃料スミア密度許容値(最大値)の評価手法として、プレナム容積を設定するための確定論的評価手法との整合性を考慮した手法を提案した(cf. 第2.2節)。
- (7) 燃料挙動解析コードCEDAR-IIを用いて、ガス圧だけではなくPCMI圧も考慮した通常運転時の被覆管周方向応力およびCDFを評価した結果、レファレンス・プラントおよび実用化プラントのいずれにおいても、現状の燃料スミア密度仕様(約88%T.D.)にて、荷重制限が満足されるとの結果を得た(cf. 第5.1節)。
- (8) 照射実績調査結果に基づき、燃料スミア密度許容値を推定したところ、レファレンス・プラントにおけるスミア密度仕様は許容値以下を満足するが、実用化プラントにおけるそれは若干上回るとの結果を得た(cf. 第5.2節)。

6.2 今後の課題

- (1) AST鋼やODS鋼の材料強度データが蓄積され、上下限式やばらつき特性がより明確になった時点で、今回の検討結果を見直す必要がある。(今回提供した確定論的評価手法の大きな修正は不要と推定するが、上限値の信頼度が変わるであろうから、若干の修正は必要になると考えられる。)
- (2) 今回のCEDAR-IIコードを用いた解析は、通常運転状態に限定したものであり、しかも軸方向出力分布の経時変化を無視しており、燃料スミア密度許容値を判断するために十分なものではない。今後、制御棒の引抜履歴を考慮した核特性3次元計算を実施し、定格出力運転中、停止・起動時や異常な過渡変化時における軸方向出力分布の変化を考慮した解析条件を設定した上で、燃料スミア密度許容値を評価する必要がある。
- (3) 今回提案した S_{m^*} 定義式変更案の妥当性根拠を裏付けるための検討が必要である。また、異常な過渡変化時や事故時の制限基準として、短期荷重(S_{m^*})制限を除外し、長期荷重(CDF)制限だけで判断することが可能かを検討する必要がある。
- (4) 燃料挙動解析コードのPCMI予測精度の検討や、ガス圧およびPCMI圧以外の応力もすべて含めた被覆管健全性の総合的評価を実施すること等にて、PCMIに起因する応力を健全性評価の中で計上することが許認可対応として可能かどうかを検討する必要がある。

謝 辞

確率論的評価を実施するに当たっては、ADSの鹿倉室長、野村室代、鶴飼副主研、および奥田研究員より、種々の有益な助言を頂いた。異常な過渡変化時の解析条件設定に際しては、プラント工学室の森山担当役、藤井副主研、および技術管理室の米川研究員より、有益な助言を頂いた。核特性計算結果は、プラント工学室の大久保副主研および原研究員より提供頂いた。PCMIを考慮したCDF評価の従来手法については、本社技術開発室の永井副主研より、教示頂いた。

また、本報告書の執筆に当たっては、プラント工学室の山下室長および若林担当役より、種々の有益なコメントを頂いた。

参考文献

- (1) PNC SJ 5449 86-001, “「もんじゅ」炉心燃料体強度評価・解析”, (1986).
- (2) PNC SJ 5449 87-001 (2), “「もんじゅ」燃料体の許認可申請に係わる助勢作業(高燃焼度炉心に係わる予測評価・解析書)”, (1987).
- (3) 中江延男、鹿倉栄: 動燃技報 No. 66, 49-61, “燃料要素健全性の確率論的評価コード「BORNFREE」の開発”, (1988).
- (4) 永井寛、他: PNC SN 941 85-159, “大型炉用燃料ピン及び集合体の設計検討(その1)”, (1985).
- (5) S. Komoda, et al. : “Evaluation of mixed-oxide fuel melting limit at low burnups”, KERNTECHNIK vol. 55(1990) (to be published).
- (6) 菰田成一、他: PNC SN 9520 90-002, “ガス圧に起因する燃料被覆管応力およびクリープ損傷和のモンテカルロ計算コードシステム「HOPE-MCR」マニュアル”, (1990).
- (7) 金城勝哉、他: PNC ZN 9410 89-171, “高速増殖大型炉設計研究-100万kWeレファレンスプラント-”, (1989).
- (8) 前田清彦、他: PNC ZN 9410 89-172, “高速増殖大型炉設計研究-150万kWe実用化プラント-”, (1989).
- (9) L. A. Lawrence, et al. : “Performance of Advanced Oxide Fuel Pins in EBR-II”, Proc. Int. Conf. on Reliable Fuels for Liquid Metal Reactors, Tucson, Arizona, 3-62(1986).
- (10) J. W. Weber, et al. : “HEDL Mixed Oxide Fuel Pin Breach Experience in EBR-II”, Proc. International Conf. on FBR Fuel Performance, Monterey, California, pp. 87-99 (1979).
- (11) P. F. Cecchi, et al. : “Life Limiting Features and Technical Problems to Reach High Burn-up in Fast Reactor”, Proc. Int. Conf. on Reliable Fuels for Liquid Metal Reactors, Tucson, Arizona, 3-1(1986).
- (12) 金子洋光、他: PNC SN 841 82-49, “燃料挙動解析コードCEDAR-IIマニュアル”, (1982).

第2.1表 PCMIを考慮した従来評価手法における統計処理対象誤差因子

誤差因子 i	補足事項	コメント
被覆管肉厚製造誤差		
ペレット密度製造誤差	これに伴う線出力変化も考慮。	密度と外径の相関性
ペレット外径製造誤差	これに伴う線出力変化も考慮。	密度と外径の相関性
ペレットO/M比製造誤差		
破断寿命信頼度誤差		
内外面腐食量誤差	ノミナル肉厚の15%に設定。	温度評価誤差との相関性
被覆管温度評価誤差	工学的安全係数のうち、統計項だけ。	
CEDARコード計算誤差	応力評価誤差に相当。	

第2.2表 PCMIを考慮した従来評価手法による評価結果の一例

誤差因子	a_i 評価結果	$\ln a_i$ 評価結果	評価項目	評価結果
被覆管肉厚製造誤差	1.16	0.15	CDF_{ref}	0.0147
ペレット密度製造誤差	2.54	0.93	$\sum_i (\ln a_i)^2$	7.210
ペレット外径製造誤差	3.36	1.21	$\{\sum_i (\ln a_i)^2\}^{1/2}$	2.685
ペレットO/M比製造誤差	1.91	0.65	$\exp[\{\sum_i (\ln a_i)^2\}^{1/2}]$	14.66
破断寿命信頼度誤差	3	1.10	CDF_{up}	0.216
内外面腐食量誤差	1.40	0.34	-----	-----
被覆管温度評価誤差	1.75	0.56	$\ln CDF_{ref}$	-4.22
CEDARコード計算誤差	5.32*	1.67	$\ln CDF_{up}$	-1.53

注記*) 応力評価誤差を100%と見積もって算出した値。

第2.3表 被覆管上限応力評価における基準解析および感度解析の主要条件

解析の種類	項目	条件	備考	
基準解析	① -a 被覆管肉厚	公称値	被覆管および燃料ピンの製造条件	
	-b 被覆管外径	公称値		
	-c 初期封入Heガス量	上限値		
	②	-a 炉心ペレット密度	上限値	燃料ペレットの製造条件
		-b 炉心ペレット外径	公称値 (r_n)	
		-c Pu富化度	上限値	
		-d 炉心部スタック長さ	公称値 (l_n)	
		-e 蒸発性不純物量	上限値	
	③	-a 内面腐食量	ノミナル(平均)式	物性条件
		-b 外面腐食量	ノミナル(平均)式	
		-c FPガス放出率(炉心部)	ノミナル(平均)式	
		-d 同上(ブランケット部)	上限値	
	④	-a 熱出力誤差	上限値	出力条件
		-b 核計算誤差	上限値	
	⑤	-a 被覆管外圧	下限値	炉内における圧力および温度条件
-b プレナムガス温度		ノミナル値		
感度解析 1	① -a 被覆管肉厚	下限値	その他は基準解析と同一	
感度解析 2	② -b ペレット外径	上限値 (r_{up})	↓	
感度解析 3	② -d 炉心部スタック長さ	上限値 (l_{up})	↓	
感度解析 4	③ -a 内面腐食量	上限式	↓	
感度解析 5	③ -b 外面腐食量	上限式	↓	
感度解析 6	③ -c FPガス放出率(炉心部)	上限式	その他は基準解析と同一	

補足) ・初期封入Heガス量、蒸発性不純物量は、炉心部からのFP放出ガス量と比較して少ないので、保守側に上限値に固定している。また、ブランケット部からのFPガス放出量も少ないので、放出率は上限値(「もんじゅ」では10%)としている。
 ・被覆管外圧、プレナムガス温度の不確かさの応力への影響は小さいので、それぞれ下限値、ノミナル値を使用するものとしている。

第2.4表 CEDAR-IIコードによるPCMI評価の主要解析条件

区分	項目	条件	区分	項目	条件
被覆管仕様	内外径	公称値	物性条件	内外面腐食量	上限式
ペレット仕様	炉心ペレット密度	上限値	炉内使用条件	線出力	公称値
	その他	公称値		被覆管温度	上限値

第3.1表 AST鋼炉心(63年度設計大型炉レファレンス炉心)の仕様

項 目		仕 様
1.	炉心燃料ペレット	
a)	材質	MOX
b)	プルトニウム富化度 (w/o)	15.4±0.6 (内側炉心)
c)	外径 (mm)	φ7.22±0.05
d)	密度 (%TD)	92±2
e)	O/M比 (-)	1.98±0.02
f)	蒸発性不純物 (μl/g-oxide)	180
2.	軸方向ブランケット燃料ペレット	
a)	材質	劣化ウラン酸化物
b)	外径 (mm)	φ7.22
c)	密度 (%TD)	94.5
d)	O/M比 (-)	2.0
e)	蒸発性不純物 (μl/g-oxide)	50
3.	被覆管	
a)	材質	改良オーステナイト鋼 (AST鋼)
b)	外径 (mm)	φ8.3±0.03
c)	内径 (mm)	φ7.4±0.025
d)	肉厚 (mm)	0.45±0.03
e)	ペレット間直径ギャップ (mm)	0.18
4.	燃料要素	
a)	炉心部長さ (mm)	1,000±5
b)	ブランケット部長さ (mm)	200/200 (上部/下部)
c)	プレナム容積(下部) (cc)	35、40 & 45
5.	原子炉入口温度 (°C)	375
6.	被覆管外圧 (kg/cm ²)	1.5 (炉心上端高さにて)

第3.2表 AST鋼製燃料ピンについての確定論的評価の結果(通常運転時、寿命末期)

考慮の燃料ペレット誤差巾	ガスプレナム容積 (cc)	周方向応力			CDF(S _t ベース)			CDF (S _R ベース)
		評価値 (kg/mm ²)	制限値 (kg/mm ²)	合否	評価値 (-)	制限値 (-)	合否	参考値(-)
2σ	35	16.2	14.5	×	3.07	1	×	0.58
	40	14.2	↓	○	1.07	↓	×	0.28
	45	12.7	↓	○	0.50	↓	○	0.17
3σ	35	16.5	↓	×	3.63	↓	×	0.65
	40	14.5	↓	△	1.22	↓	×	0.31
	45	12.9	14.5	○	0.56	1	○	0.19

第3.3表 AST鋼製燃料ピンについての基準および感度解析の詳細
(通常運転時、寿命末期、プレナム容積45cc)

	基準 解析	感度解析					
		1	2	3	4	5	6
解析条件							
被覆管肉厚	公称値	下限値	公称値	→	→	→	公称値
ペレット外径	公称値	公称値	上限値	公称値	→	→	公称値
炉心スタック長さ	公称値	→	公称値	上限値	公称値	→	公称値
内面腐食式	平均式	→	→	平均式	上限式	平均式	平均式
外面腐食式	平均式	→	→	→	平均式	上限式	平均式
FP放出率式	平均式	→	→	→	→	平均式	上限式
2σ 誤差巾での評価結果*							
被覆管肉厚 (mm)	0.285	0.255	0.285	0.282	0.250	0.241	0.285
ピーク線出力 (W/cm)	451.5	451.5	455.6	451.5	→	→	451.5
被覆管肉厚中心温度 (°C)	679.5	→	679.5	681.0	679.5	→	679.5
内面腐食量 (μm)	65	→	→	65	100	65	65
外面腐食量 (μm)	100	→	100	103	100	144	100
FPガス放出率 (%)	90	→	→	→	→	90	100
被覆管内圧 (kg/cm ²)	72.2	72.2	72.8	72.5	72.2	72.2	79.6
被覆管応力 (kg/mm ²)	9.89	11.09	9.97	10.03	11.32	11.65	10.90
応力増分 (kg/mm ²)	—	1.21	0.09	0.14	1.43	1.76	1.02
CDF(S _t ベース) (-)	0.153	0.240	0.158	0.177	0.263	0.280	0.227
3σ 誤差巾での評価結果*							
被覆管肉厚 (mm)	0.285	0.255	0.285	0.282	0.250	0.241	0.285
ピーク線出力 (W/cm)	460.5	460.5	466.9	460.5	→	→	460.5
被覆管肉厚中心温度 (°C)	679.5	→	679.5	681.0	679.5	→	679.5
内面腐食量 (μm)	65	→	→	65	100	65	65
外面腐食量 (μm)	100	→	100	103	100	144	100
FPガス放出率 (%)	90	→	→	→	→	90	100
被覆管内圧 (kg/cm ²)	73.5	73.5	74.4	73.8	73.5	73.5	81.1
被覆管応力 (kg/mm ²)	10.07	11.30	10.20	10.21	11.53	11.87	11.11
応力増分 (kg/mm ²)	—	1.23	0.13	0.14	1.46	1.80	1.04
CDF(S _t ベース) (-)	0.164	0.263	0.173	0.191	0.289	0.308	0.247

注*) いずれも、寿命末期での計算結果である。

第3.4表 AST鋼製燃料ピンについての確定論的評価の結果
(通常運転+異常な過渡変化時、寿命末期、プレナム容積45cc)

考慮の燃料ペレット誤差巾	解析条件			周方向応力				CDF (S_t ベース) の過渡時増分 (-)	
	ピーク温度 (°C)	過渡想定回数 (-)	過渡変化時のクリープ強度式の種類	評価値 (kg/mm ²)	旧Sm* =(1/2)·Su*		新Sm* =(3/4)·Sy*		
					制限値 (kg/mm ²)	合否	制限値 (kg/mm ²)		合否
2σ	750	1	急加バースト	12.7	11.6	×	14.6	○	0.0045
	740	1	↓	↓	12.0	↓	15.3	↓	0.0033
	760	1	↓	↓	11.1	↓	14.0	↓	0.0064
	750	2	急加バースト	↓	11.6	↓	14.6	↓	0.0090
	750	1	内圧クリープ	12.7	11.6	×	14.6	○	0.00002
3σ	750	1	急加バースト	12.9	11.6	×	14.6	○	0.0052
	740	1	↓	↓	12.0	↓	15.3	↓	0.0038
	760	1	↓	↓	11.1	↓	14.0	↓	0.0073
	750	2	急加バースト	↓	11.6	↓	14.6	↓	0.010
	750	1	内圧クリープ	12.9	11.6	×	14.6	○	0.00002

第3.5表 AST鋼製燃料ピンについての原型炉手法による評価の結果(通常運転時)

ガスプレナム容積 (cc)	周方向応力			CDF(S_t ベース)		
	評価値 (kg/mm ²)	制限値 (kg/mm ²)	合否	評価値 (-)	制限値(-)	合否
40	21.4	14.5	×	48.4	1	×
50	17.2	↓	×	4.51	↓	×
60	14.3	↓	△	1.01	↓	×
70	12.3	14.5	○	0.38	1	○

第3.6表 ODS鋼炉心(63年度設計実用化プラント炉心)の仕様

項 目	仕 様
1. 炉心燃料ペレット	
a) 材質	MOX
b) プルトニウム富化度 (w/o)	16.8±0.6 (内側炉心)
c) 外径 (mm)	φ7.62±0.05
d) 密度 (%TD)	92±2
e) O/M比 (-)	1.98±0.02
f) 蒸発性不純物 (μl/g-oxide)	180
2. 軸方向ブランケット燃料ペレット	
a) 材質	劣化ウラン酸化物
b) 外径 (mm)	φ7.62
c) 密度 (%TD)	94.5
d) O/M比 (-)	2.0
e) 蒸発性不純物 (μl/g-oxide)	50
3. 被覆管	
a) 材質	改良オーステナイト鋼
b) 外径 (mm)	φ9.0±0.03
c) 内径 (mm)	φ7.8±0.025
d) 肉厚 (mm)	0.6±0.03
e) ペレット間直径ギャップ (mm)	0.18
4. 燃料要素	
a) 炉心部長さ (mm)	1,200±5
b) ブランケット部長さ (mm)	300±2/300±2 (上部/下部)
c) プレナム容積(下部) (cc)	60 & 70
5. 原子炉入口温度 (°C)	395
6. 被覆管外圧 (kg/cm ²)	1.5 (炉心上端高さにて)

第3.7表 ODS鋼製燃料ピンについての確定論的評価の結果(通常運転時、寿命末期)

考慮の燃料ペレット誤差巾	ガスプレナム容積 (cc)	周方向応力			CDF(S _t ベース)			CDF (S _R ベース)
		評価値 (kg/mm ²)	制限値 (kg/mm ²)	合否	評価値 (-)	制限値 (-)	合否	参考値(-)
2σ	60	14.4	13.7	×	20.3	1	×	0.042
	70	12.3	↓	○	0.29	↓	○	0.00060
3σ	60	14.6	↓	×	33.2	↓	×	0.068
	70	12.6	13.7	○	0.48	1	○	0.00098

第3.8表 ODS鋼製燃料ピンについての基準および感度解析の詳細
(通常運転時、寿命末期、プレナム容積70cc)

	基準 解析	感度解析					
		1	2	3	4	5	6
解析条件							
被覆管肉厚	公称値	下限値	公称値	→	→	→	公称値
ペレット外径	公称値	公称値	上限値	公称値	→	→	公称値
炉心スタック長さ	公称値	→	公称値	上限値	公称値	→	公称値
内面腐食式	平均式	→	→	平均式	上限式	平均式	平均式
外面腐食式	平均式	→	→	→	平均式	上限式	平均式
FP放出率式	平均式	→	→	→	→	平均式	上限式
2σ誤差中での評価結果*							
被覆管肉厚 (mm)	0.399	0.369	0.399	0.396	0.364	0.338	0.399
ピーク線出力 (W/cm)	457.2	457.2	461.2	457.2	→	→	457.2
被覆管肉厚中心温度 (°C)	660.9	→	660.9	662.0	660.9	→	660.9
内面腐食量 (μm)	65	→	→	65	100	65	65
外面腐食量 (μm)	136	→	136	139	136	197	136
FPガス放出率 (%)	90	→	→	→	→	90	100
被覆管内圧 (kg/cm^2)	95.3	95.3	96.1	95.7	95.3	95.3	105.3
被覆管応力 (kg/mm^2)	9.94	10.79	10.03	10.05	10.95	11.64	10.99
応力増分 (kg/mm^2)	—	0.85	0.08	0.11	1.00	1.70	1.04
CDF(S_t ベース) (—)	0.0007	0.0071	0.0009	0.0011	0.0104	0.0520	0.0117
3σ誤差中での評価結果*							
被覆管肉厚 (mm)	0.399	0.369	0.399	0.396	0.364	0.338	0.399
ピーク線出力 (W/cm)	465.8	465.8	472.0	465.8	→	→	465.8
被覆管肉厚中心温度 (°C)	660.9	→	660.9	662.0	660.9	→	660.9
内面腐食量 (μm)	65	→	→	65	100	65	65
外面腐食量 (μm)	136	→	136	139	136	197	136
FPガス放出率 (%)	90	→	→	→	→	90	100
被覆管内圧 (kg/cm^2)	97.0	97.0	98.2	77.4	97.0	97.0	107.2
被覆管応力 (kg/mm^2)	10.12	10.98	10.25	10.23	11.14	11.85	11.18
応力増分 (kg/mm^2)	—	0.86	0.13	0.11	1.02	1.73	1.06
CDF(S_t ベース) (—)	0.0012	0.0115	0.0017	0.0018	0.0170	0.0847	0.0191

注*) いずれも、寿命末期での計算結果である。

第4.1表 AST鋼炉心における燃料仕様等の確率密度関数

No.	確率変数	分布型	下限値	中央値	上限値	標準偏差
1	熱出力誤差 (%)	一様分布	-2.0	0.0	2.0	—
2	核計算誤差 (%)	一様分布	-5.0	0.0	5.0	—
3	炉心スタック軸長 (cm)	正規分布	99.5	100.0	100.5	0.25
4	炉心ペレット外径 (mm)	正規分布	7.17	7.22	7.27	0.0167
5	炉心ペレット密度 (%TD)	正規分布	90.0	$92.0 \times (7.22/D)^2$	94.0	0.667
6	炉心ペレットPuO ₂ 富化度 (-)	正規分布	0.148	0.154	0.160	0.002
7	炉心ペレットO/M比 (-)	(中央値固定)	(1.96)	1.98	(2.00)	—
8	被覆管肉厚 (mm)	正規分布	0.42	0.428	0.48	0.004
9	被覆管外径 (mm)	(上限固定)	(8.27)	(8.30)	8.33	—

注記) Dは燃料ペレット外径のサンプリング値。

第4.2表 AST鋼製燃料ピンについての確率論的評価の結果(通常運転時、寿命末期)

ガスプレナム容積 (cc)	周方向応力がSm*を越える確率 (%)		CDF(S _t ベース)		CDF(S _t ベース)が1を越える確率 (%)
	旧Sm*=(1/2)·Su* =14.5 kg/mm ²	新Sm*=(3/4)·Sy* =18.7 kg/mm ²	1を越える確率 (%)	最大値 (-)	
35	2.9	0.008	0.27	11.1	0.00067
40	0.22	0	0.016	2.74	0
45	0.0067	0	0	0.945	0

第4.3表 AST鋼製燃料ピンについての確率論的評価の結果

(通常運転+異常な過渡変化時、寿命末期、ガスプレナム容積:45cc)

解析条件				周方向応力がSm*を越える確率 (%)				CDF (S _t ベース)が、1を越える確率 (%)	CDF (S _t ベース)の過渡時増分の最大値 (-)
ケース	ピーク温度 (°C)	過渡想定回数 (-)	過渡変化時のクリープ強度式の種類	旧Sm*=(1/2)·Su*		新Sm*=(3/4)·Sy*			
				Sm* (kg/mm ²)	確率 (%)	Sm* (kg/mm ²)	確率 (%)		
1	750	1	急加バースト	11.6	2.0	14.6	0.006	0	0.051
2	740	1	↓	12.0	0.96	15.3	0.001	0	0.038
3	760	1	↓	11.1	3.82	14.0	0.019	0	0.071
4	750	2	急加バースト	11.6	2.0	14.6	0.006	0	0.102
5	750	1	内圧クリープ	11.6	2.0	14.6	0.006	0	5×10 ⁻⁵

第5.1表 AST鋼ピンの被覆管外面温度分布履歴*、および高速中性子束分布 (PCMI評価用)

炉中心高さからの距離 (cm)	-70	-50	-30	-15	-5	5	15	30	50
	∫ -50	∫ -30	∫ -15	∫ -5	∫ 5	∫ 15	∫ 30	∫ 50	∫ 70
BO1C (0日)での温度分布 (°C)	380	400	443	486	528	568	607	646	641
EO1C (456日)での温度分布 (°C)	380	400	450	500	550	597	643	690	685
BO2C (456日)での温度分布 (°C)	380	400	441	482	523	561	598	636	631
EO2C (912日)での温度分布 (°C)	380	400	448	497	545	590	635	680	675
BO3C (912日)での温度分布 (°C)	380	400	440	479	519	555	591	627	622
EO3C (1368日)での温度分布 (°C)	380	400	447	494	541	585	628	671	666
高速中性子束分布 ($\times 10^{15}$ n/cm ² -sec)	1.0	1.6	2.1	2.3	2.4	2.3	2.1	1.6	1.0
末期照射量分布 ($\times 10^{23}$ n/cm ²)	1.2	1.9	2.5	2.7	2.8	2.7	2.5	1.9	1.2

* 炉心上端高さでの被覆管肉厚中心温度が、ガス圧によるCDF評価での温度とほぼ一致するように、被覆管外面温度(CEDARで解析する際の境界条件)を設定した。

第5.2表 ODS鋼ピンの被覆管外面温度分布履歴*、および高速中性子束分布 (PCMI評価用)

炉中心高さからの距離 (cm)	-90	-60	-35	-15	-5	5	15	35	60
	∫ -60	∫ -35	∫ -15	∫ -5	∫ 5	∫ 15	∫ 35	∫ 60	∫ 90
BO1C (0日)での温度分布 (°C)	400	420	470	522	550	578	625	671	666
EO1C (730日)での温度分布 (°C)	400	420	475	530	560	590	640	690	685
BO2C (730日)での温度分布 (°C)	400	420	465	513	538	562	604	645	640
EO2C (1460日)での温度分布 (°C)	400	420	470	522	550	578	625	670	665
BO3C (1460日)での温度分布 (°C)	400	420	460	505	529	555	595	627	622
EO3C (2190日)での温度分布 (°C)	400	420	466	515	541	566	610	652	647
高速中性子束分布 ($\times 10^{15}$ n/cm ² -sec)	1.2	1.9	2.5	2.7	2.8	2.7	2.5	1.9	1.2
末期照射量分布 ($\times 10^{23}$ n/cm ²)	2.3	3.6	4.7	5.1	5.3	5.1	4.7	3.6	2.3

* 炉心上端高さでの被覆管肉厚中心温度が、ガス圧によるCDF評価での温度とほぼ一致するように、被覆管外面温度(CEDARで解析する際の境界条件)を設定した。

第5.3表 EBR-IIにおけるFFTF用高性能設計燃料ピンのRTCB試験の概要⁹⁾

燃料ピンの 名称	製造仕様					照射条件			破損原因
	ピン 外径 (mm)	肉厚 (mm)	スミア 密度 (%TD)	O/M 比 (-)	Pu 富化度 (%)	ピーク 線出力 (W/cm)	内面 ピーク 温度 (°C)	ピーク 燃焼度 (at. %)	
P-40-D91	5.84	0.25	88.2	1.957	25	513	629	12.2	FCCI
P-41R-C35	6.86	0.28	90.3	1.929	↓	401	579	11.6	FCCI
P-41R-C38	↓	↓	90.3	1.929	↓	406	561	11.7	脆化(LME)
P-42R-C114	↓	↓	92.3	1.945	↓	404	574	3.9	PCMI
P-42R-D1	↓	↓	↓	1.916	↓	473	560	1.8	↓
P-42R-D2	6.86	0.28	92.3	1.916	↓	456	621	2.5	↓
P-43-C39	5.84	0.38	90.6	1.937	↓	334	523	12.7	↓
P-43-C50	↓	0.38	89.8	1.955	↓	356	544	11.6	↓
P-43-D77	5.84	0.25	91.0	1.943	25	334	583	5.5	PCMI
P-50-A12	7.37	0.41	90.6	1.968	15	398	609	9.8	FPの過剰蓄積
P-52-A9	↓	0.30	86.7	1.978	↓	421	588	12.5	局所温度上昇
P-52-A10	↓	↓	86.7	1.978	↓	414	599	12.3	局所温度上昇
P-52-C31	↓	↓	91.2	1.973	↓	434	593	7.5	PCMI
P-52-D52	7.37	0.30	91.2	1.973	15	423	599	9.3	局所温度上昇

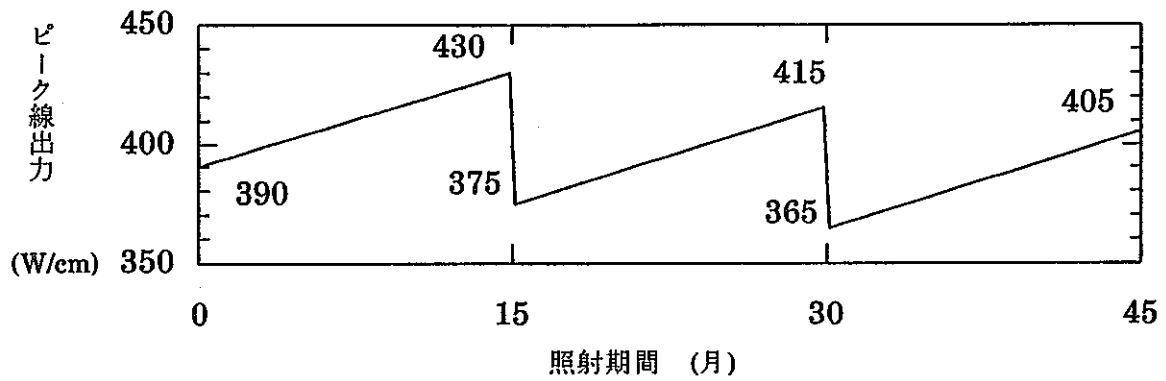
注記) ・被覆管は、いずれも316/20% c.w. 材製である。

・P-40-D91ピンの高速中性子照射量および末期ガス圧(内圧)は、それぞれ $9 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ および 40.9 kg/cm^2 である¹⁰⁾。

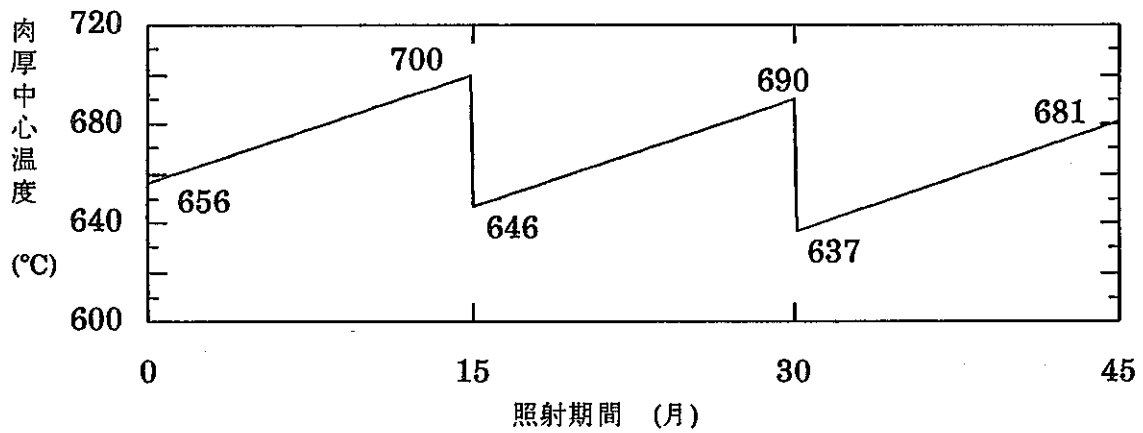
第5.4表 RTCB試験における破損原因に対する補足説明

破損原因	補足説明
PCMI	被覆管破損部高さにて、ペレット中心空孔が消失し、ペレット-被覆管間の残留ギャップ巾が非常に小さく、さらに圧縮状態にあったことを示唆するペレットの周方向クラックの存在が観察された場合、PCMI破損に分類している。
局所温度上昇	<p>被覆管破損部の組織観察結果より、被覆管温度が局所的に計算値より上昇していたことが明らかになった場合、局所温度上昇に分類している。</p> <p>尚、通常のスUS316系の20%冷間加工材を被覆管材として使用しているので、局所温度上昇はBDIに起因する被覆管同志やラップ管との接触に起因すると推定できる。</p>
FCCI	被覆管破損部において、過大な内面腐食(P-40-D91ピン:~50 μ mとP-41R-C35ピン:113 μ m)が観察された場合、FCCIに分類している。
脆化(LME)	LME(Liquid Metal Embrittlement)によると思われる被覆管の脆化(延性の著しい低下)との記載がある。
FPの過剰蓄積	UO ₂ インシュレータペレットとギャップ部に蓄積されたFPの機械的相互作用との記載がある。

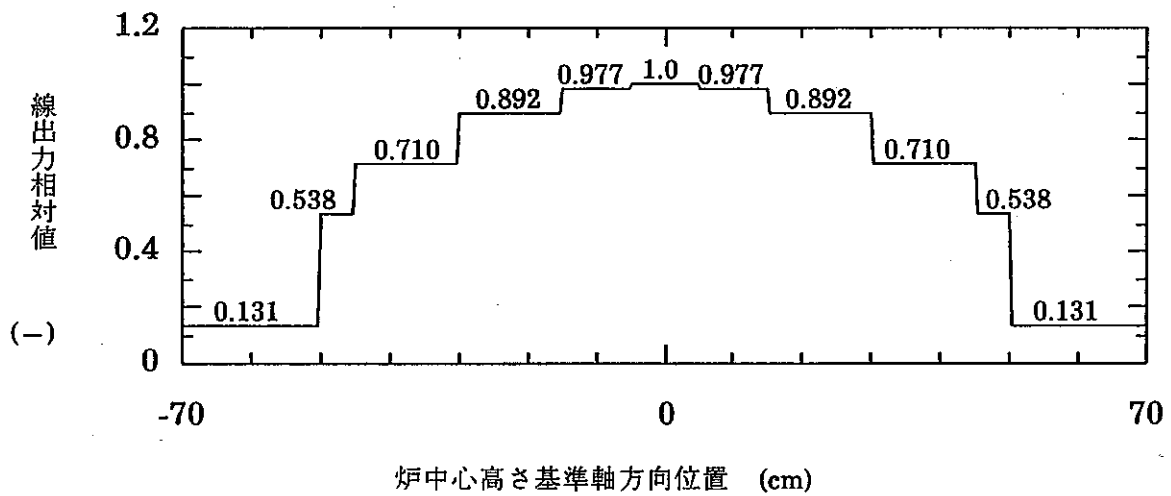
注記) 本来、破損原因は一つに絞れるものではなく、他の原因(表に記載されていないガス圧、スエリング差も含む)も重畳している可能性があることに留意する必要がある。



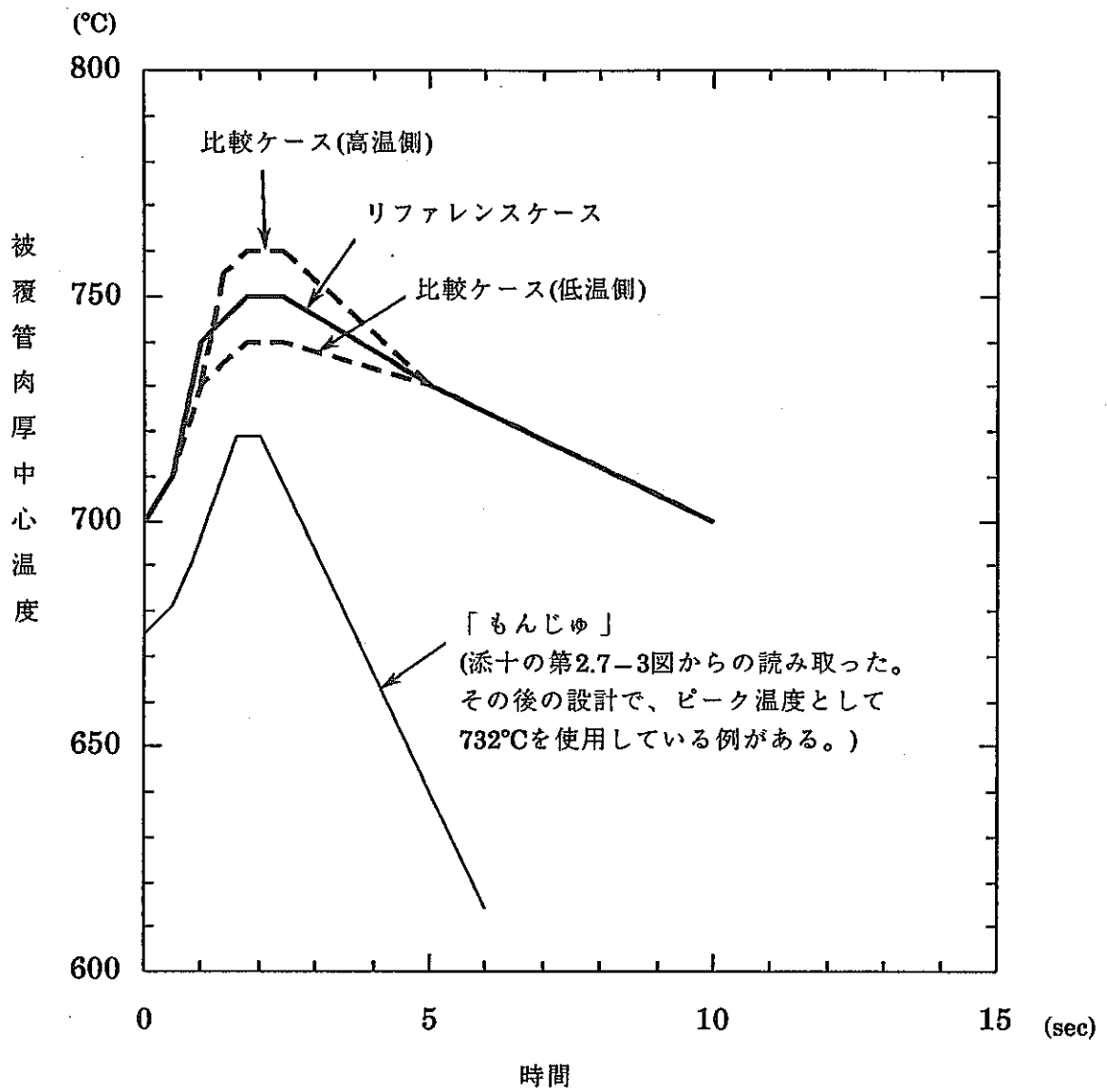
第3.1図 AST鋼炉心における通常運転時ピーク線出力(公称値)の履歴



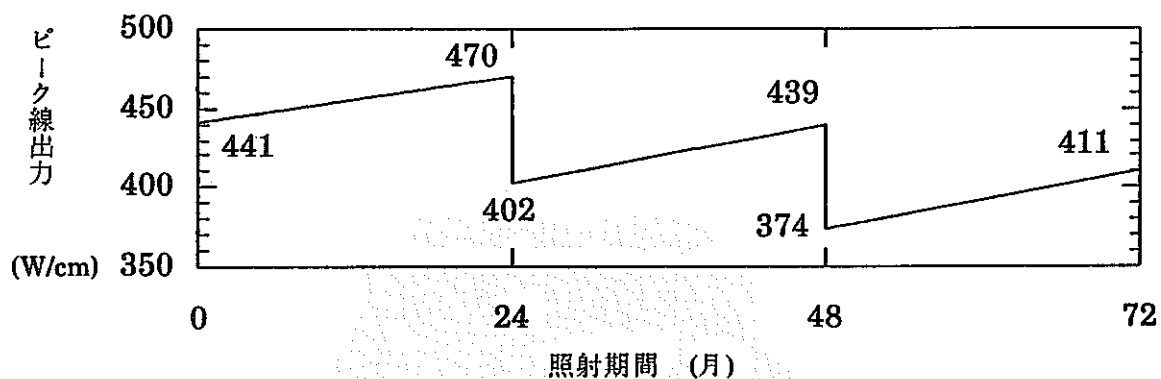
第3.2図 AST鋼炉心における、通常運転時被覆管肉厚中心ホットスポット温度の履歴



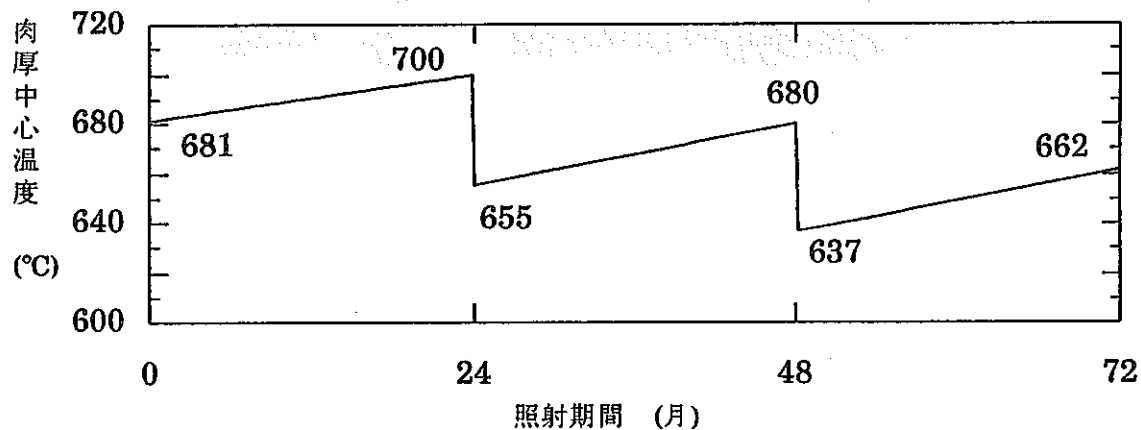
第3.3図 AST鋼炉心における寿命中平均出力(通常運転時)軸方向相対分布



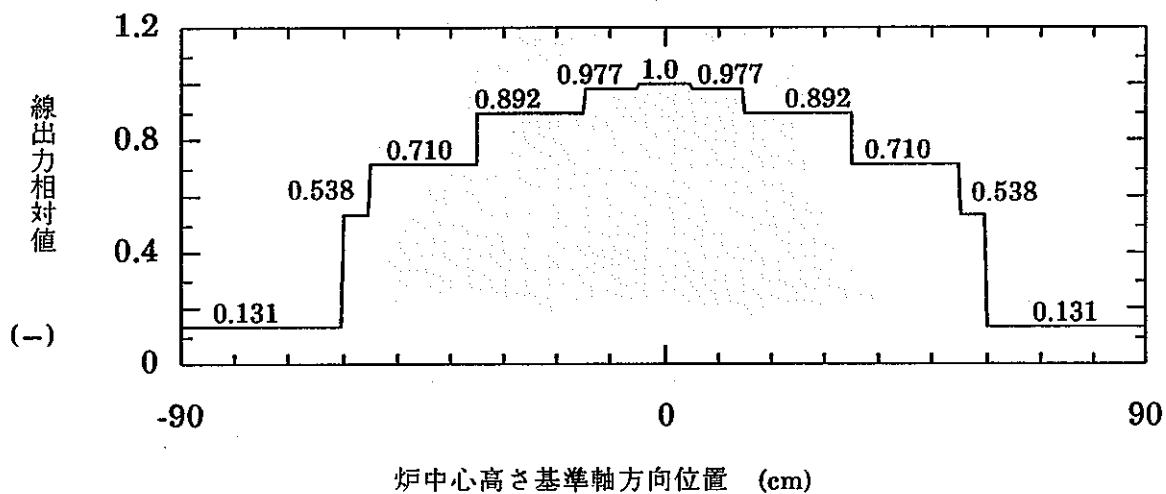
第3.4図 AST鋼炉心における外部電源喪失以降の被覆管肉厚中心温度



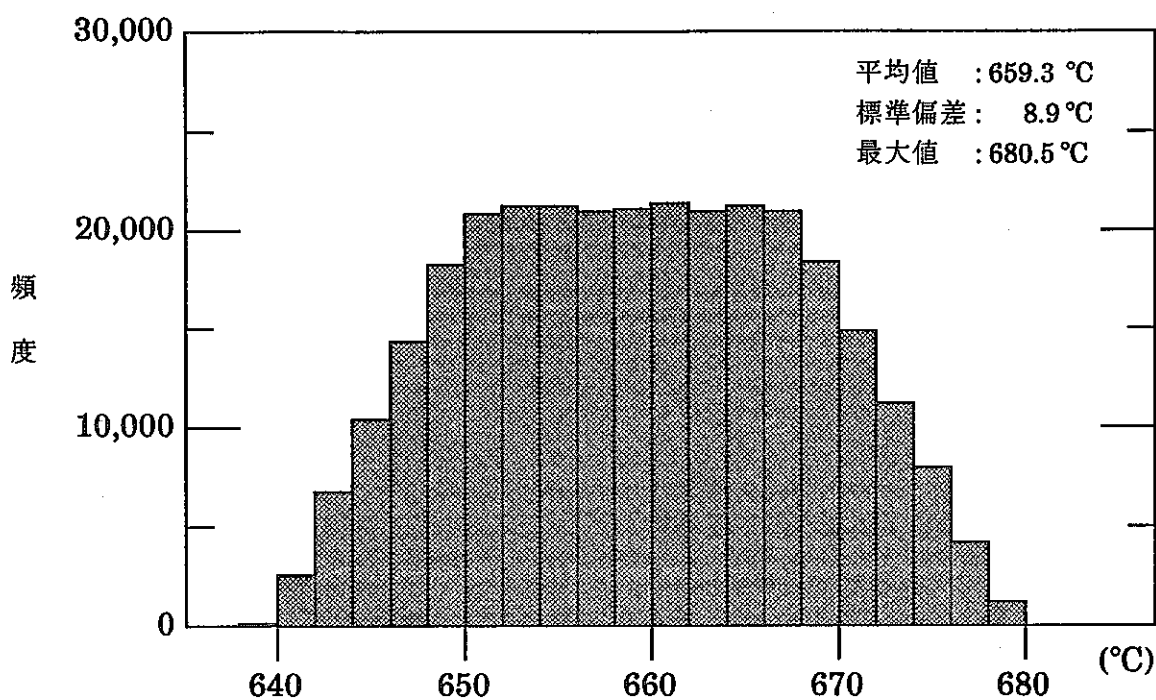
第3.5図 ODS鋼炉心における通常運転時ピーク線出力(公称値)の履歴



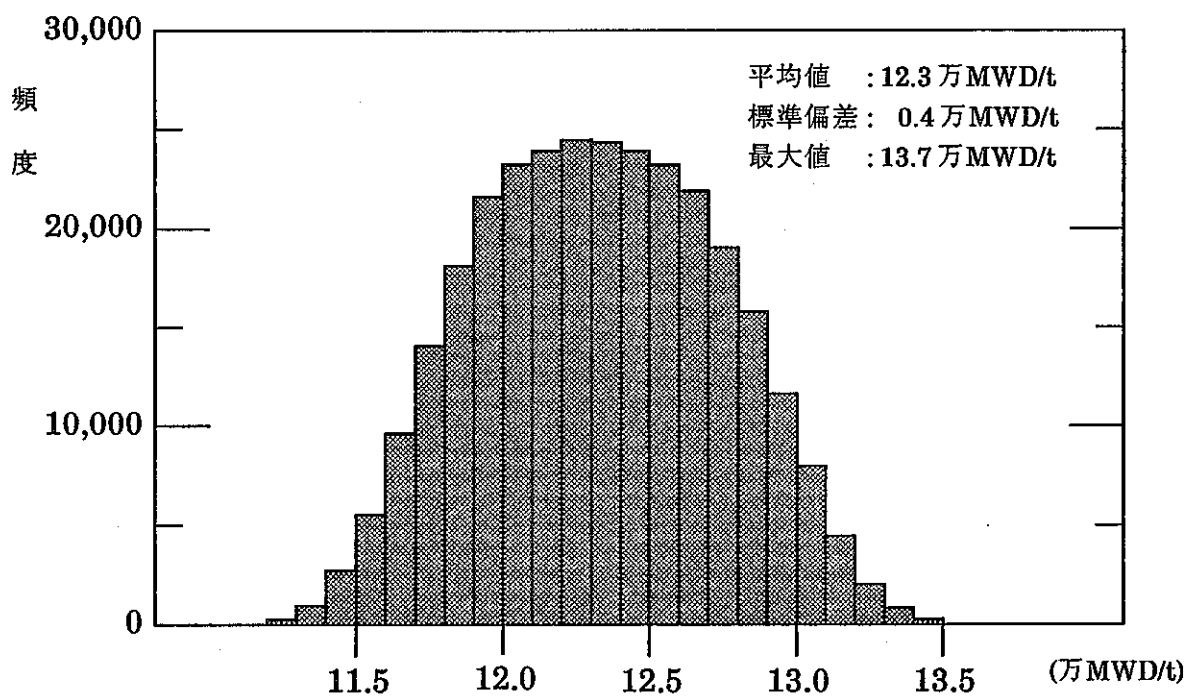
第3.6図 ODS鋼炉心における、通常運転時被覆管肉厚中心ホットスポット温度の履歴



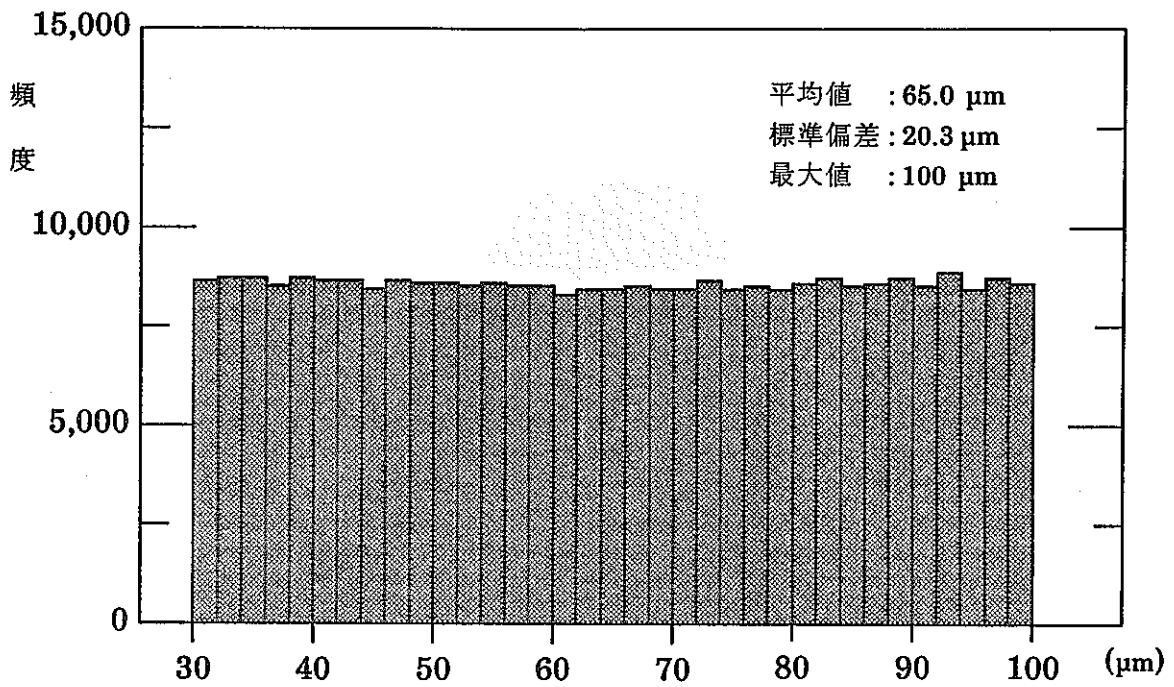
第3.7図 ODS鋼炉心における寿命中平均出力(通常運転時)軸方向相対分布



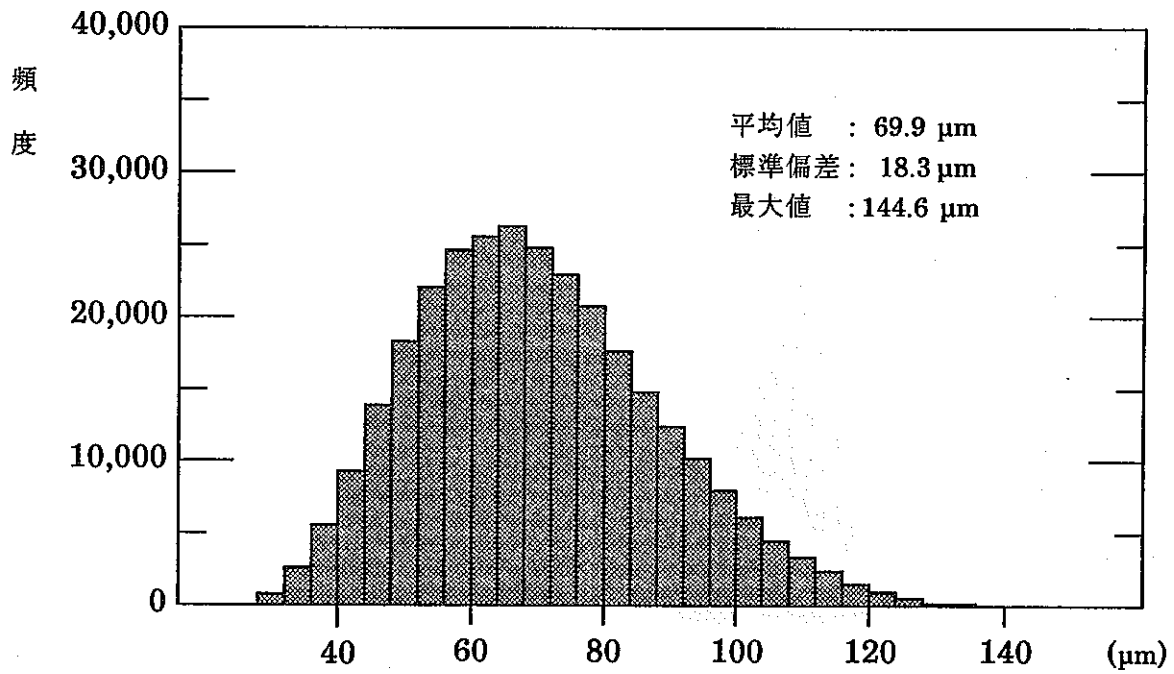
第4.1図 寿命末期の炉心上端高さにおける通常運転時被覆管肉厚中心温度



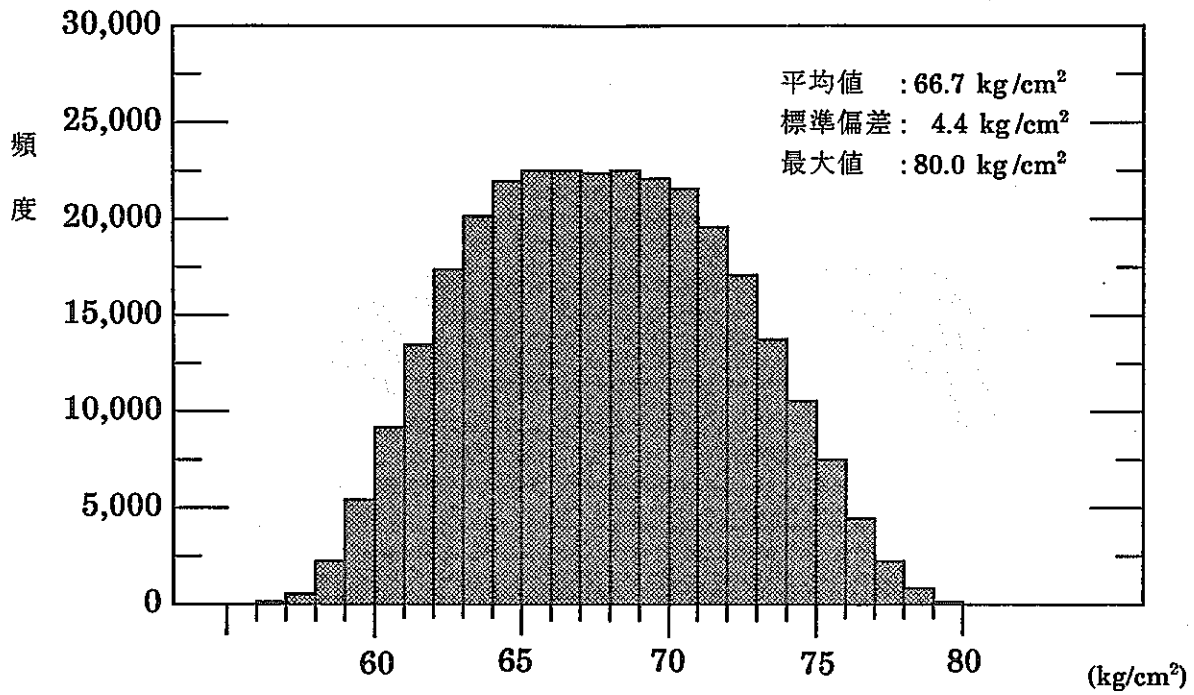
第4.2図 寿命末期の炉心部平均燃焼度



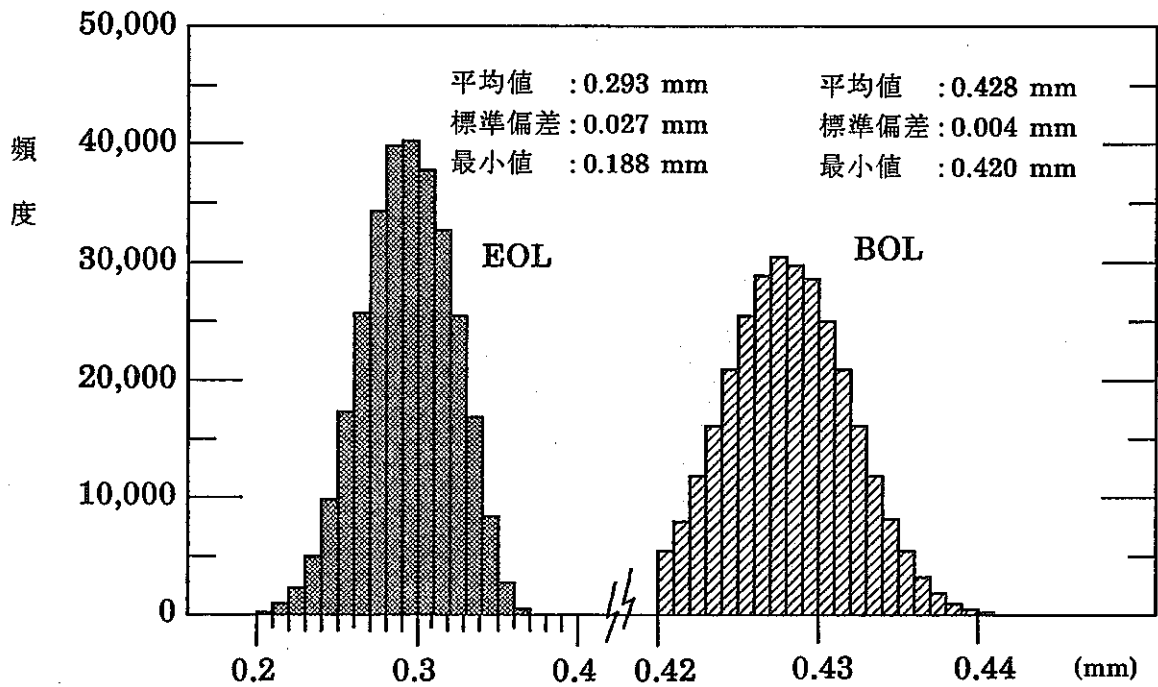
第4.3図 寿命末期の炉心上端高さにおける被覆管内面腐食量



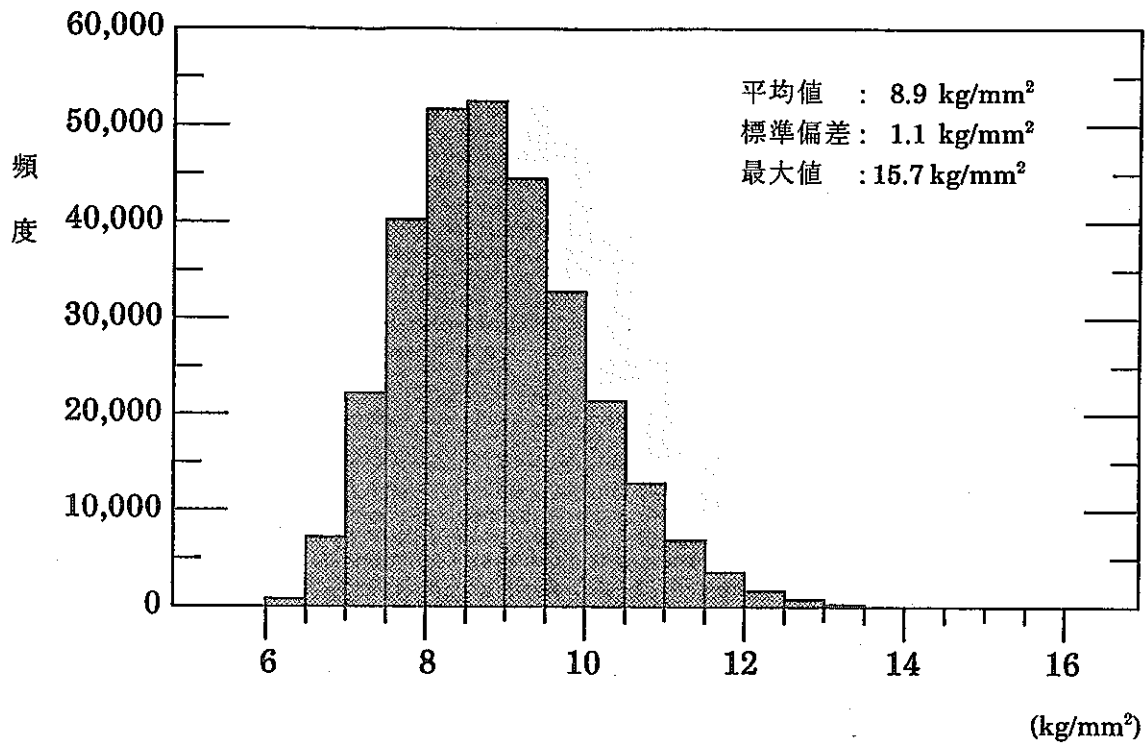
第4.4図 寿命末期の炉心上端高さにおける被覆管外面腐食量



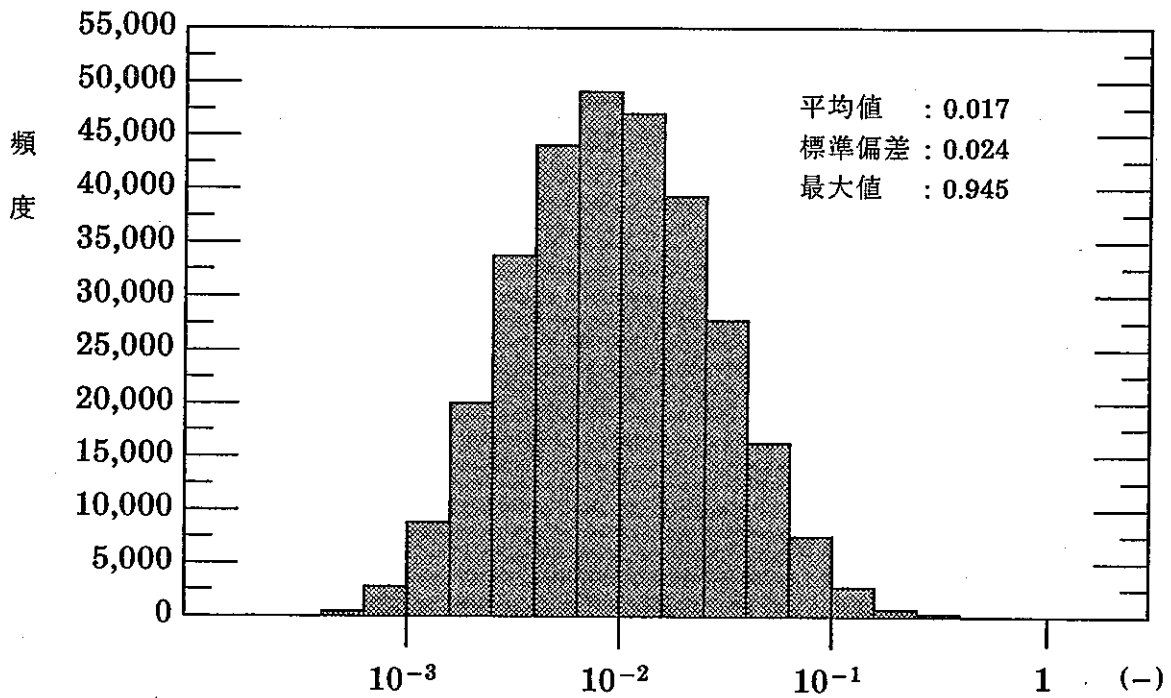
第4.5図 寿命末期の被覆管内圧 (プレナム容積: 45 cc)



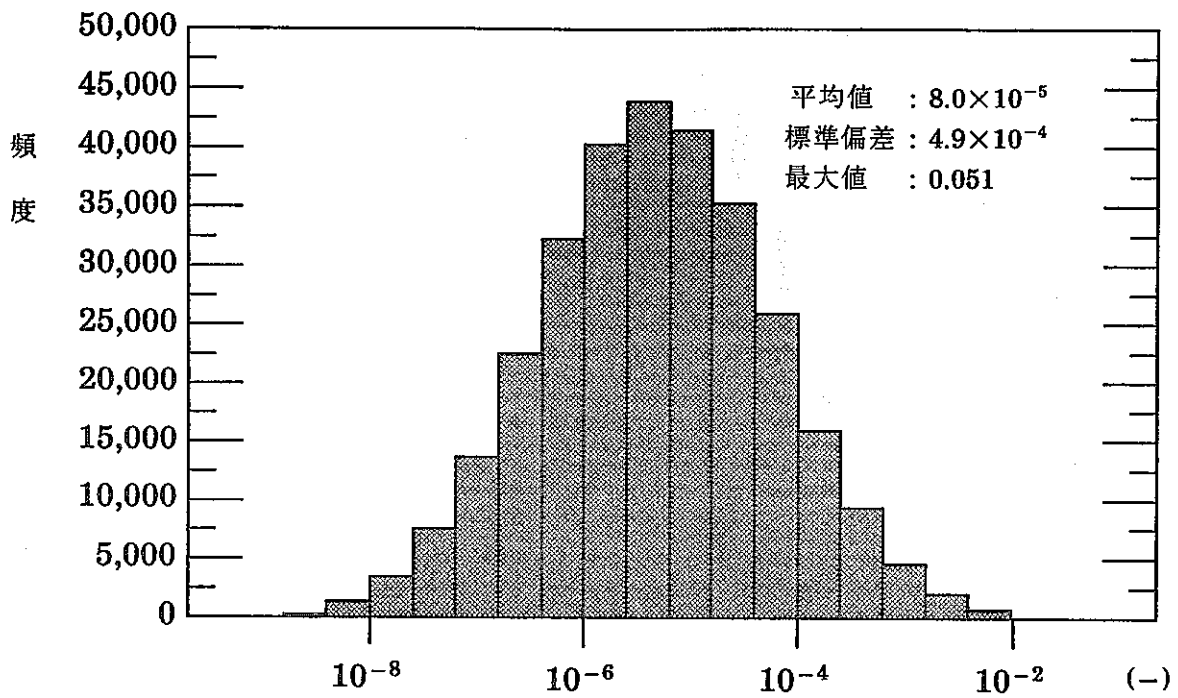
第4.6図 寿命初期/末期の被覆管肉厚



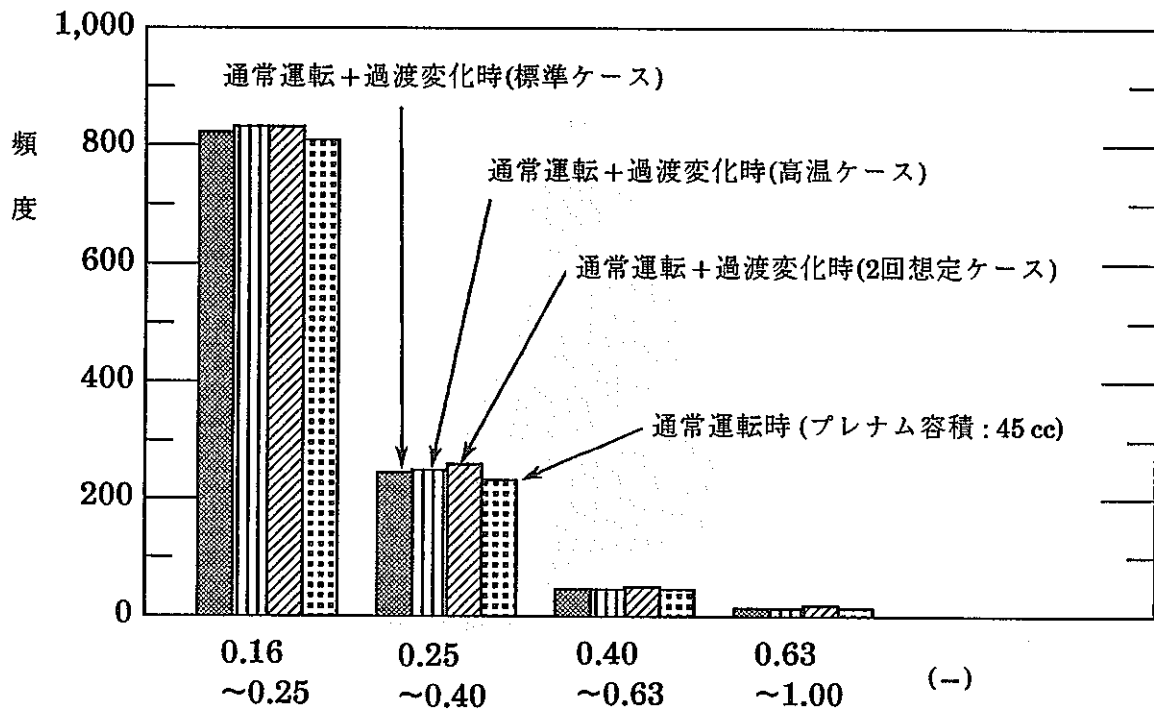
第4.7図 寿命末期の被覆管周方向応力 (プレナム容積: 45 cc)



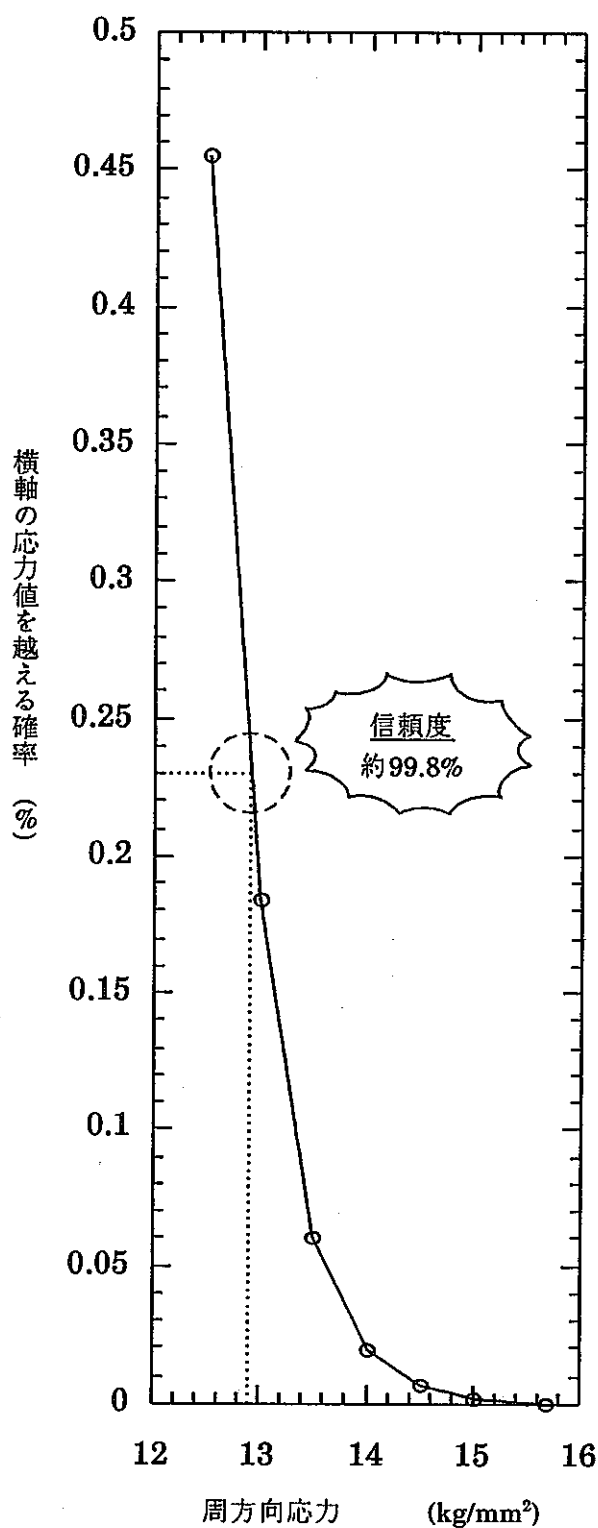
第4.8図 通常運転時の寿命末期CDF(S_tベース) (プレナム容積: 45 cc)



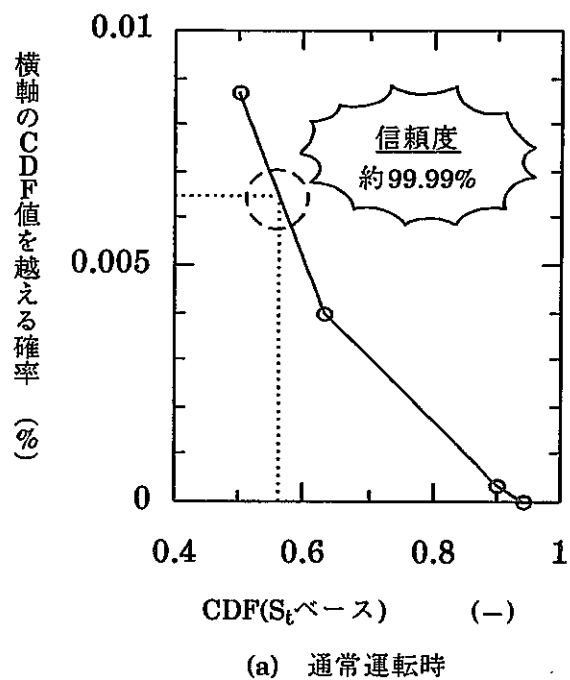
第4.9図 過渡変化時(標準ケース)のCDF(S_t ベース)増分



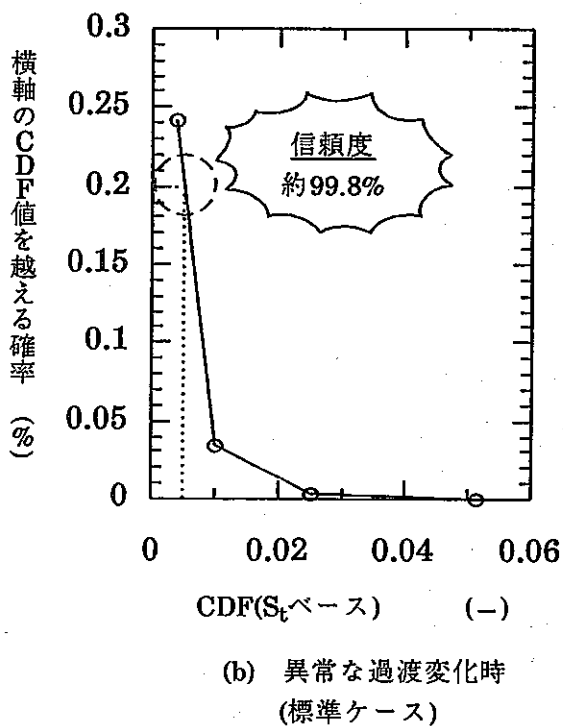
第4.10図 通常運転+過渡変化時のCDF(S_t ベース)



第4.11図 確定論的評価にて得られる
応力値の信頼度

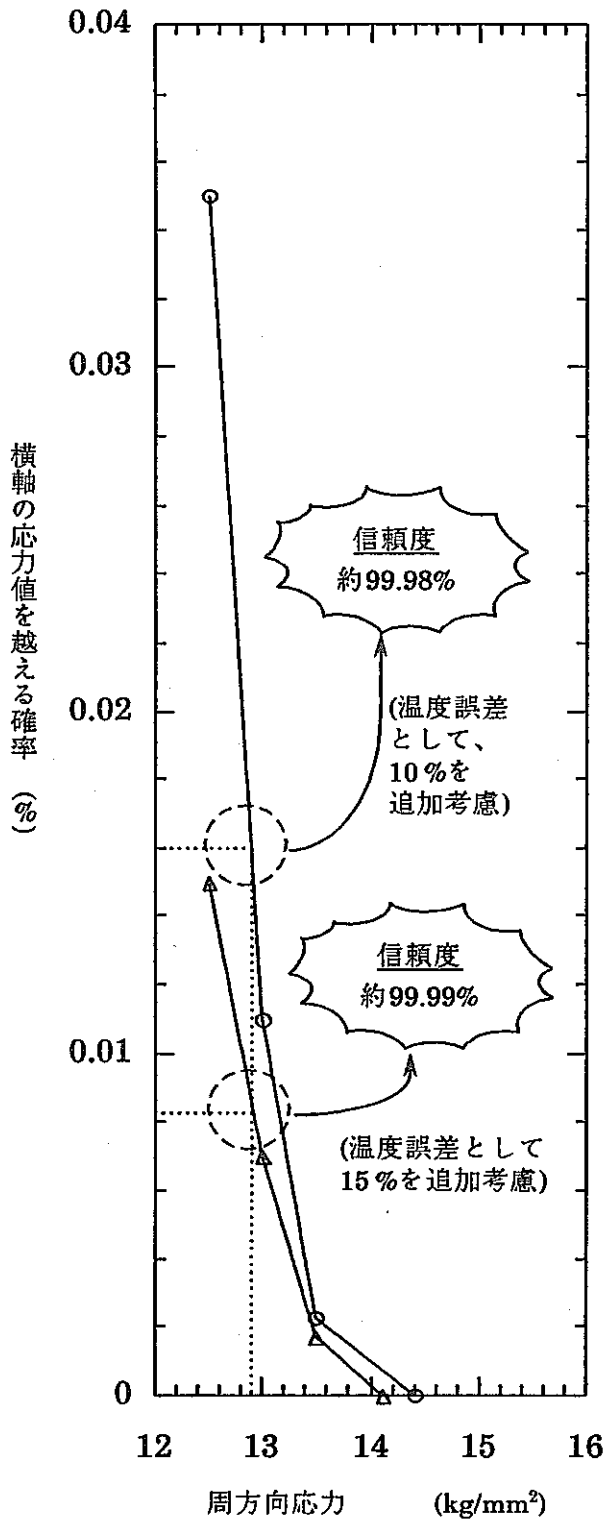


(a) 通常運転時

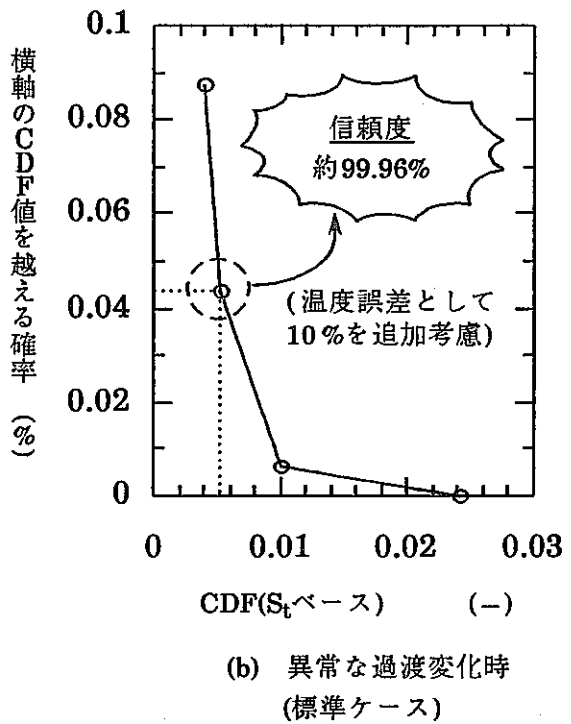
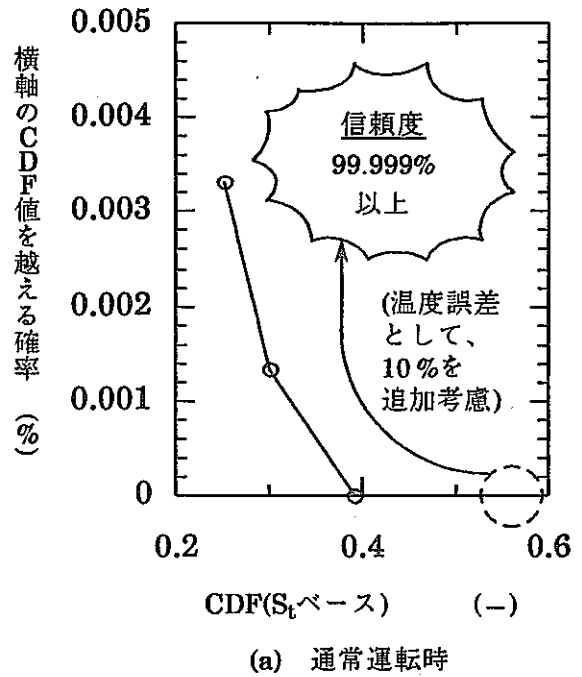


(b) 異常な過渡変化時
(標準ケース)

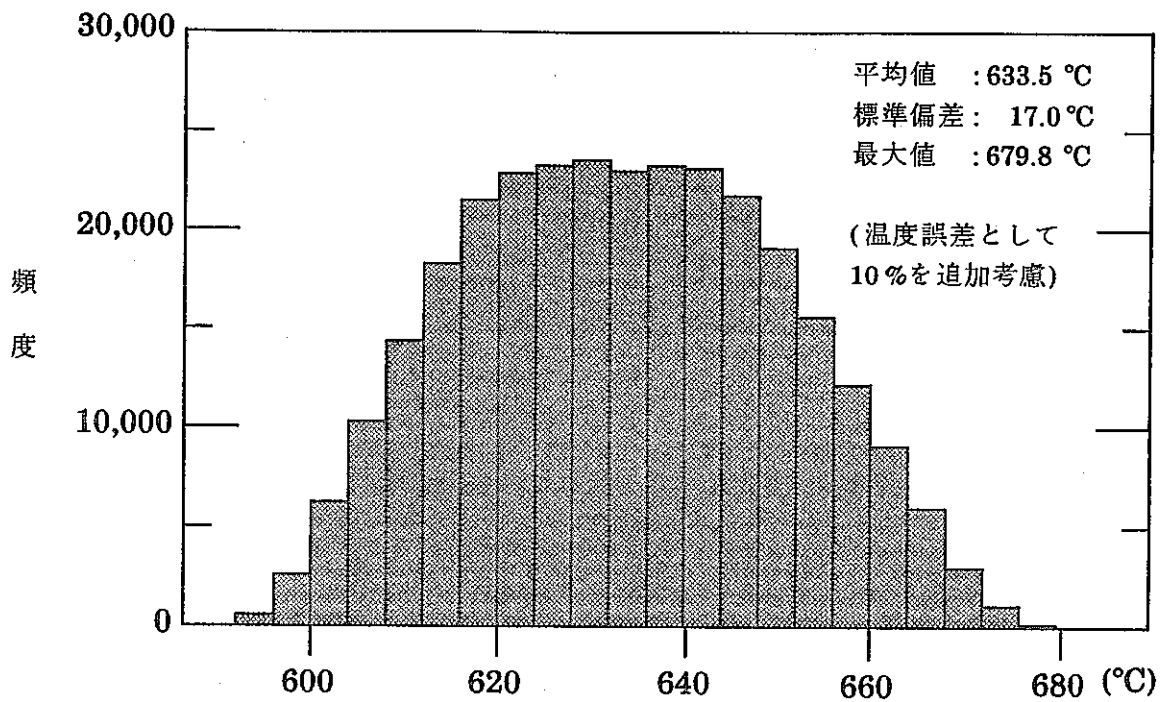
第4.12図 確定論的評価にて得られる
CDFの信頼度



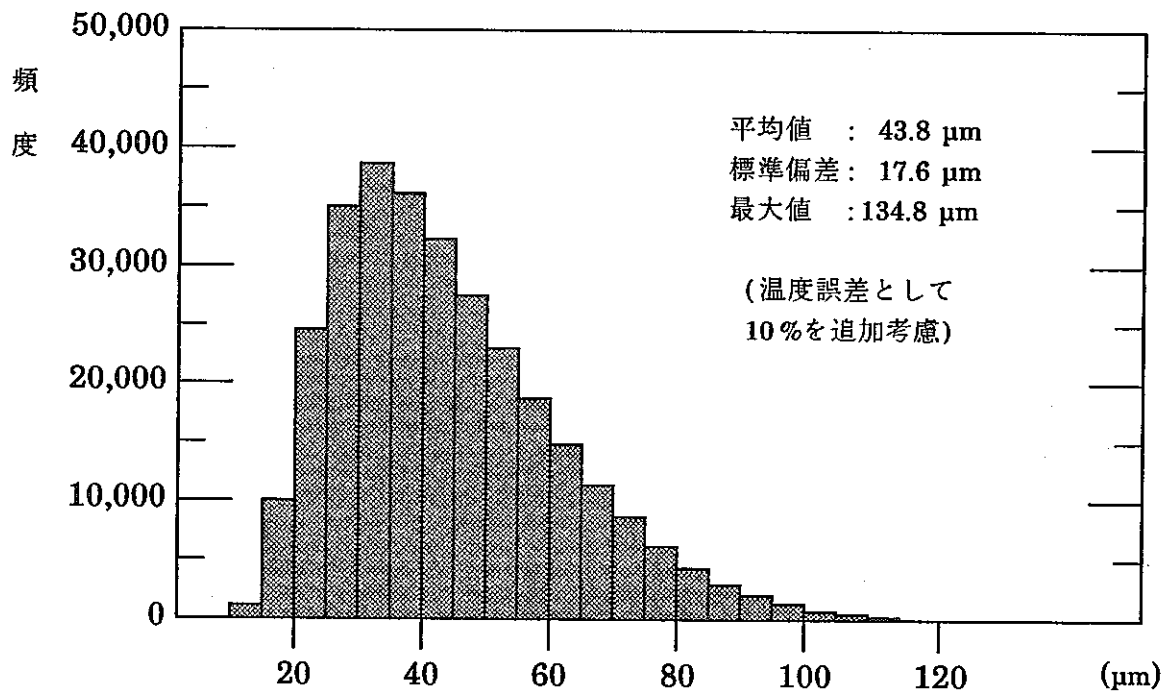
第4.13図 確定論的評価にて得られる
応力値の信頼度(見直し後)



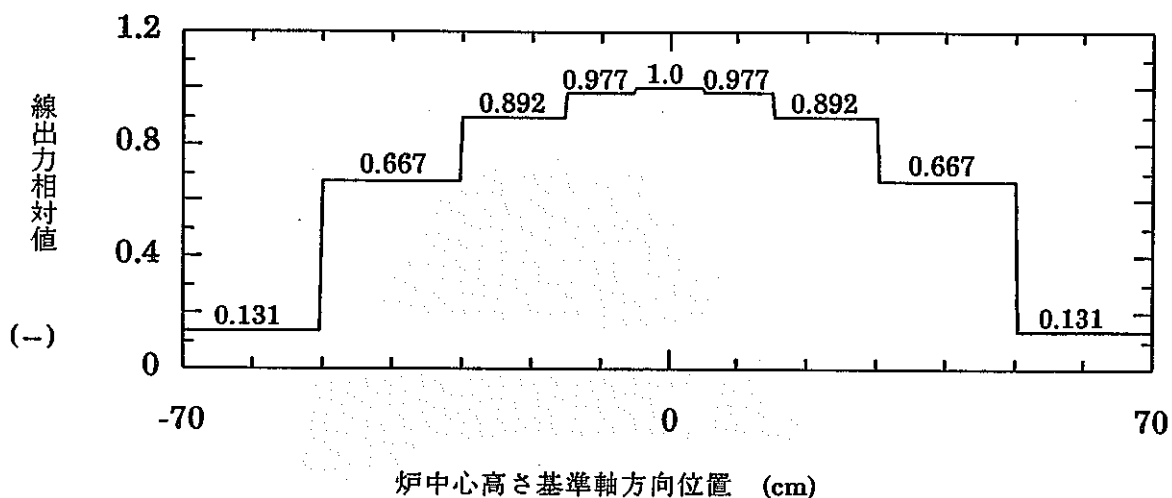
第4.14図 確定論的評価にて得られる
CDFの信頼度(見直し後)



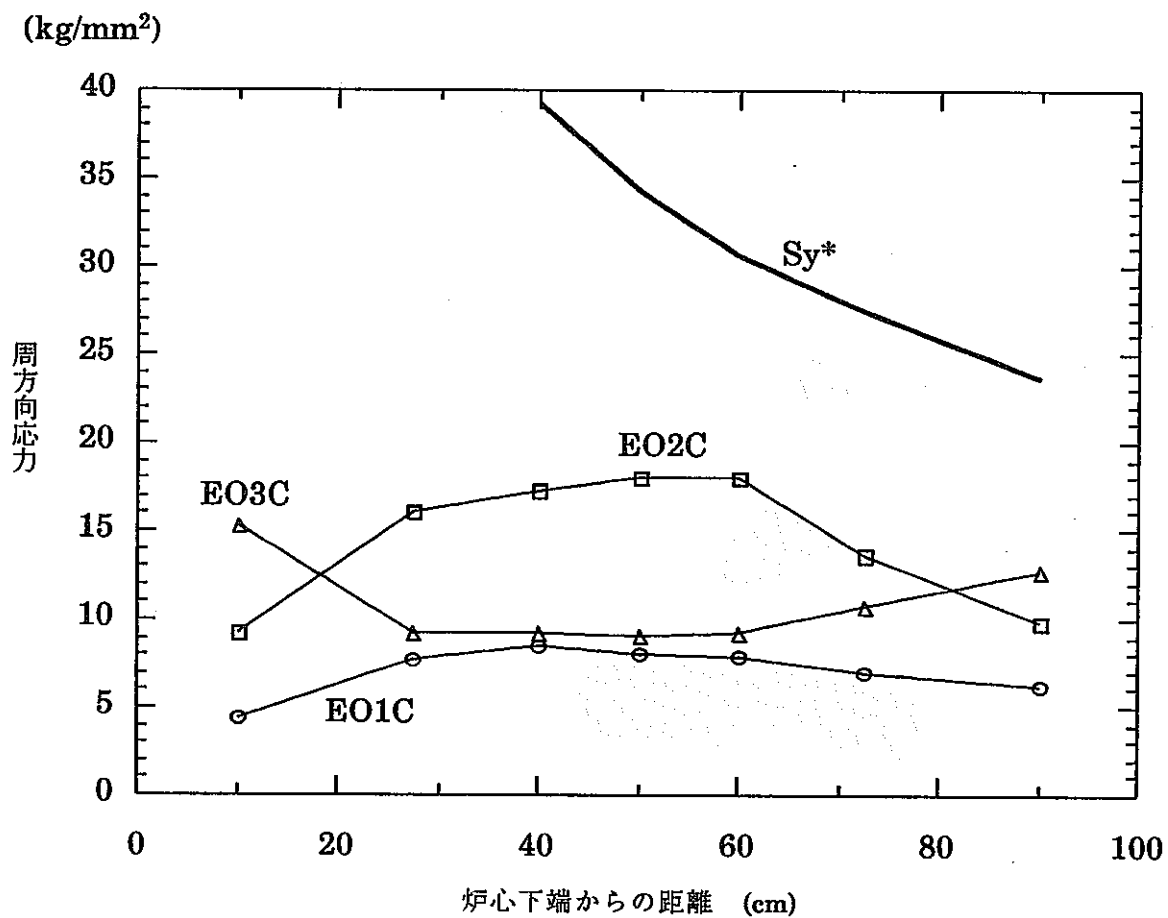
第4.15図 寿命末期の炉心上端高さにおける通常運転時被覆管肉厚中心温度(見直し後)



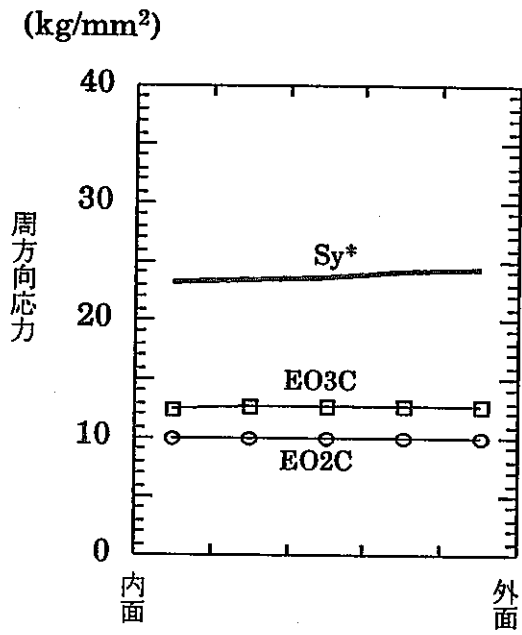
第4.16図 寿命末期の炉心上端高さにおける被覆管外面腐食量(見直し後)



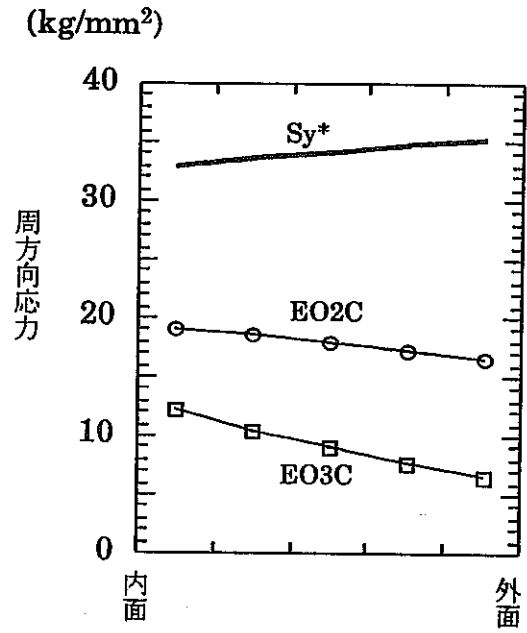
第5.1図 AST鋼炉心における寿命中平均出力(通常運転時)軸方向相対分布



第5.2図 AST鋼炉心における被覆管肉厚中心応力解析結果

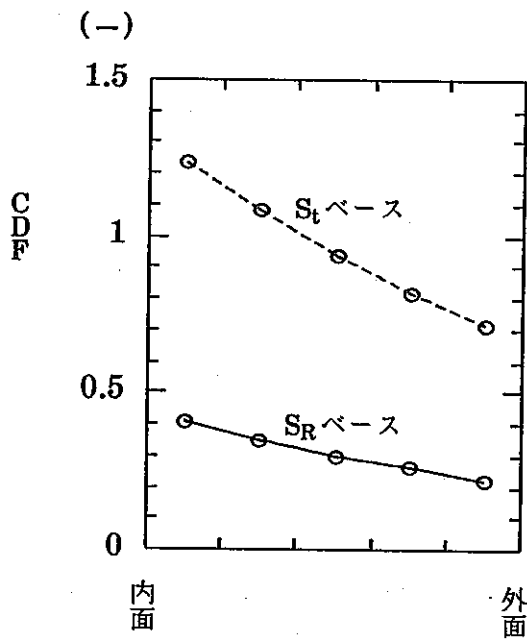


(a) 炉心上端高さにおいて

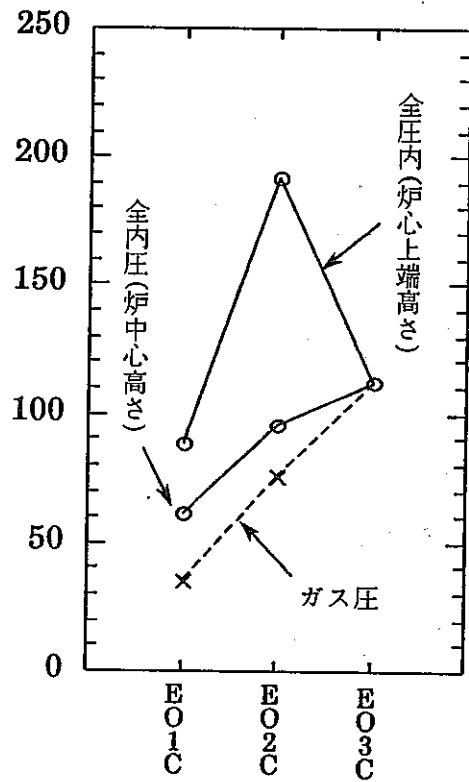


(b) 炉中心高さにおいて

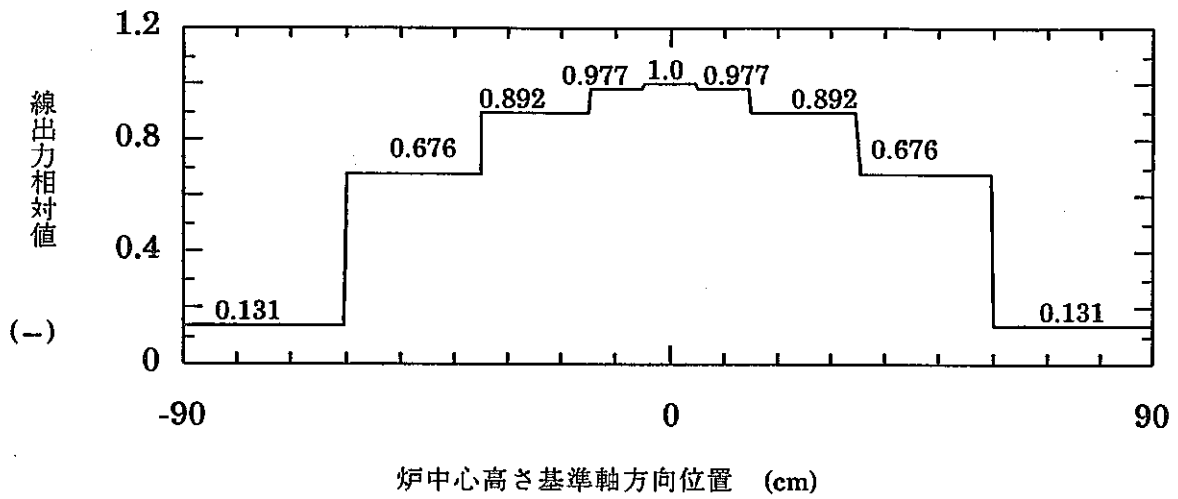
第5.3図 AST鋼炉心における被覆管応力解析結果



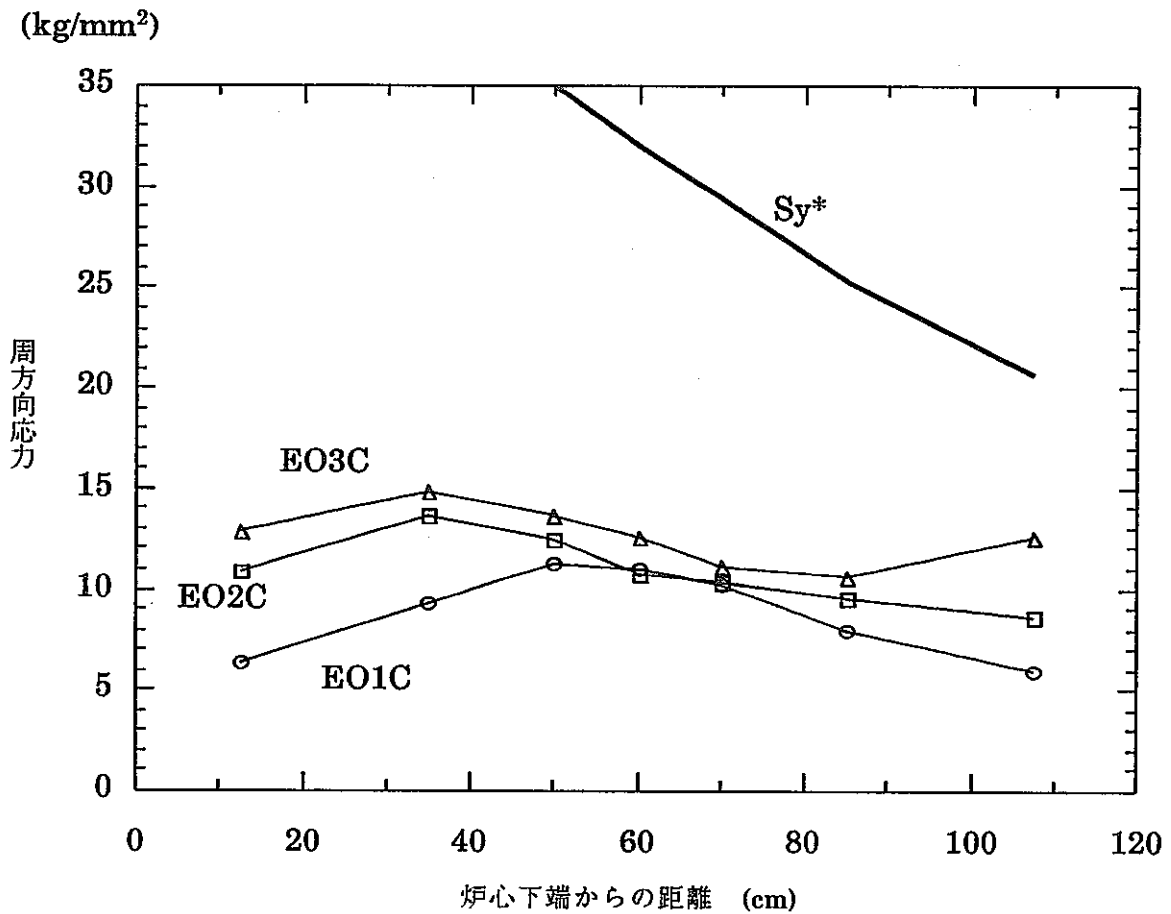
第5.4図 AST鋼炉心におけるCDF解析結果



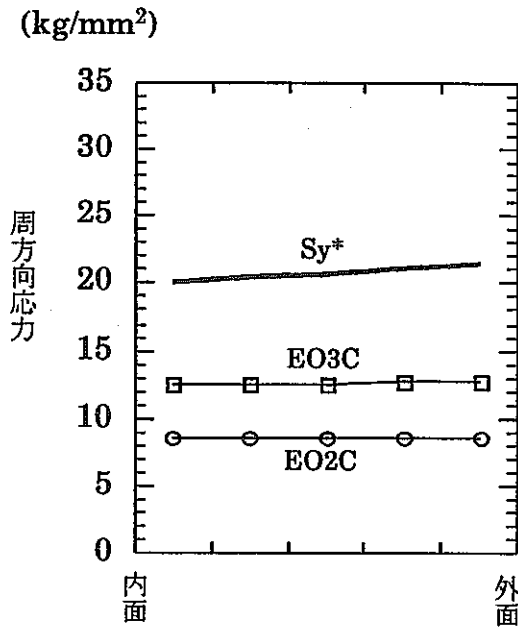
第5.5図 AST鋼炉心における内圧解析結果



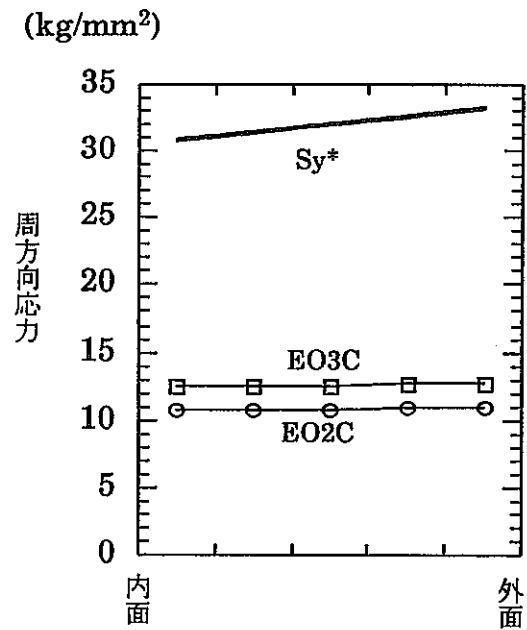
第5.6図 ODS鋼炉心における寿命中平均出力(通常運転時)軸方向相対分布



第5.7図 ODS鋼炉心における被覆管肉厚中心応力解析結果

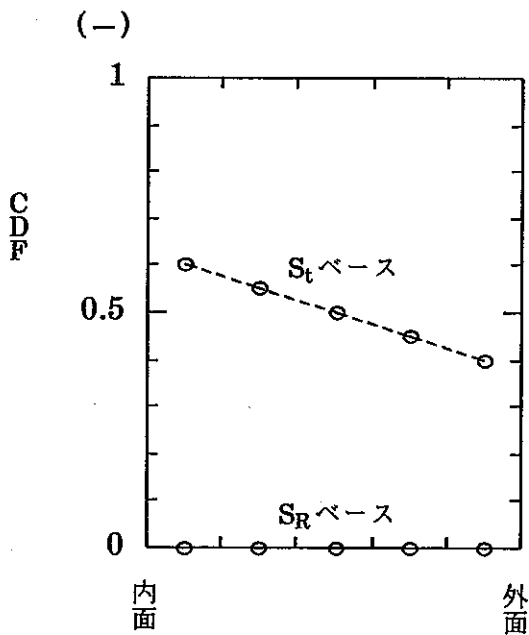


(a) 炉心上端高さにおいて

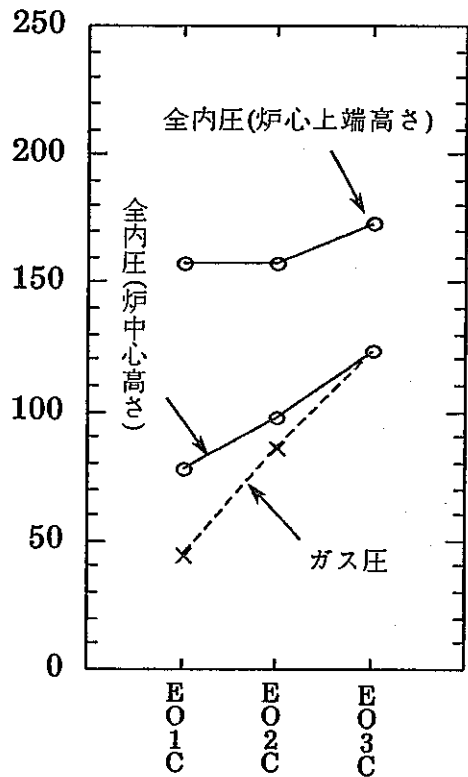


(b) 炉中心高さにおいて

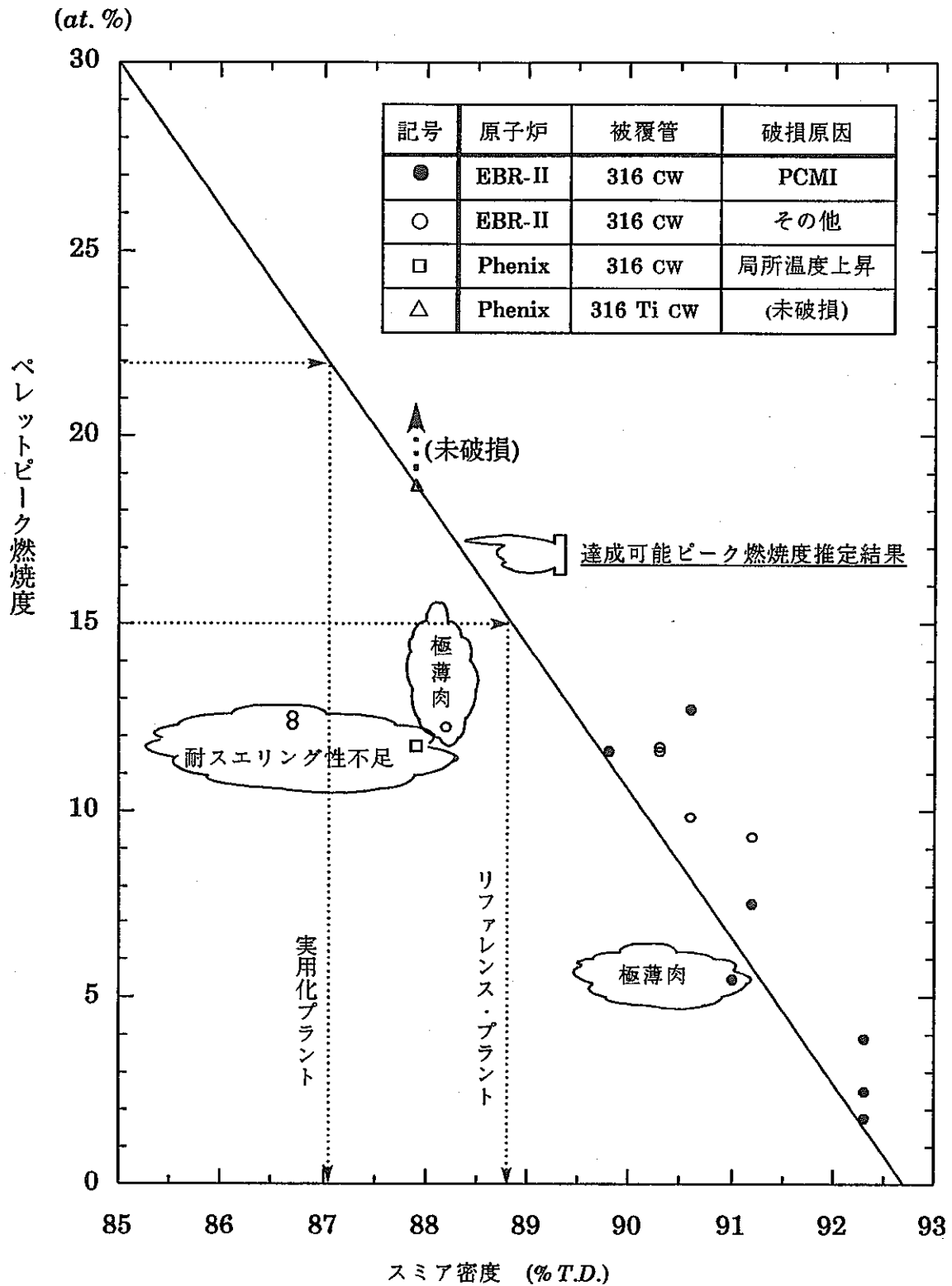
第5.8図 ODS鋼炉心における被覆管応力解析結果



第5.9図 ODS鋼炉心におけるCDF解析結果



第5.10図 ODS鋼炉心における内圧解析結果



第5.11図 EBR-IIにおけるFFTF用高性能設計燃料ピンのRTCB試験の結果⁹⁾と Phenixにおけるドライバー燃料ピンの照射実績¹¹⁾

Appendix HOPEコードのマニュアル

A コード概要

(1) 主要機能

HOPE (A computing-code for calculations of the upper limits of the hoop stress and cumulative damage fraction due to the fission gas pressure in the fuel cladding) は、1本の燃料ピンについて、ガス圧に起因する被覆管周方向応力およびクリープ損傷和(CDF)の上限値を確定論的手法にて計算するためのコードであり、被覆管温度が高々700°Cで、温度の経時変化が緩慢である通常運転時(長期間挙動)の計算、および被覆管温度変化が著しく、短時間ではあるが通常運転時の温度を上回る過渡変化時(短時間挙動)の計算の2通りの評価計算が可能である。評価対象部位は、炉心上端部(すなわち被覆管最高温度部)肉厚中心に限定されている。

本コードを用いることによって、周方向応力およびCDFの上限値を確定論的に評価できる。また、温度履歴を与えた各時刻点における炉内強度劣化を考慮した設計応力強さ S_m^* および設計降伏点 S_y^* も同時に計算し、出力するので、被覆管周方向応力制限値とこれらの値を比較することで、寿命期間中における燃料被覆管の健全性を確認できる。

(2) 適用対象燃料ピン

混合酸化物燃料ペレットを被覆管に充填し、ガスプレナムを下部に設置した構造の燃料ピンに適用可能である。

実験炉「常陽」、原型炉「もんじゅ」では、上部ガスプレナム方式が採用されているが、燃料ピン短尺化の観点における下部ガスプレナム方式の優越性や仏国での使用実績から、実証炉以降の設計では下部方式に変更されることが確実視される。このような状況のため、適用対象燃料ピンを下部ガスプレナム方式に限定している。上部プレナム方式の燃料ピンの必要ガスプレナム容積評価に本コードを適用したい場合には、下部プレナム方式と見なして必要容積を求めた上で、下部方式と上部方式でのガスプレナム温度の違いを考慮した補正が必要である。

また、均質炉心燃料ピンを対象として開発したコードではあるが、入力データ作成時に若干の工夫をする(すなわち、内部ブランケットを上部または下部ブランケットに隣接させたピンを想定し、この条件に合わせて被覆管肉厚中心温度および線出力の軸方向分布データを作成する)

ことで、軸非均質燃料ピンにも適用可能である。

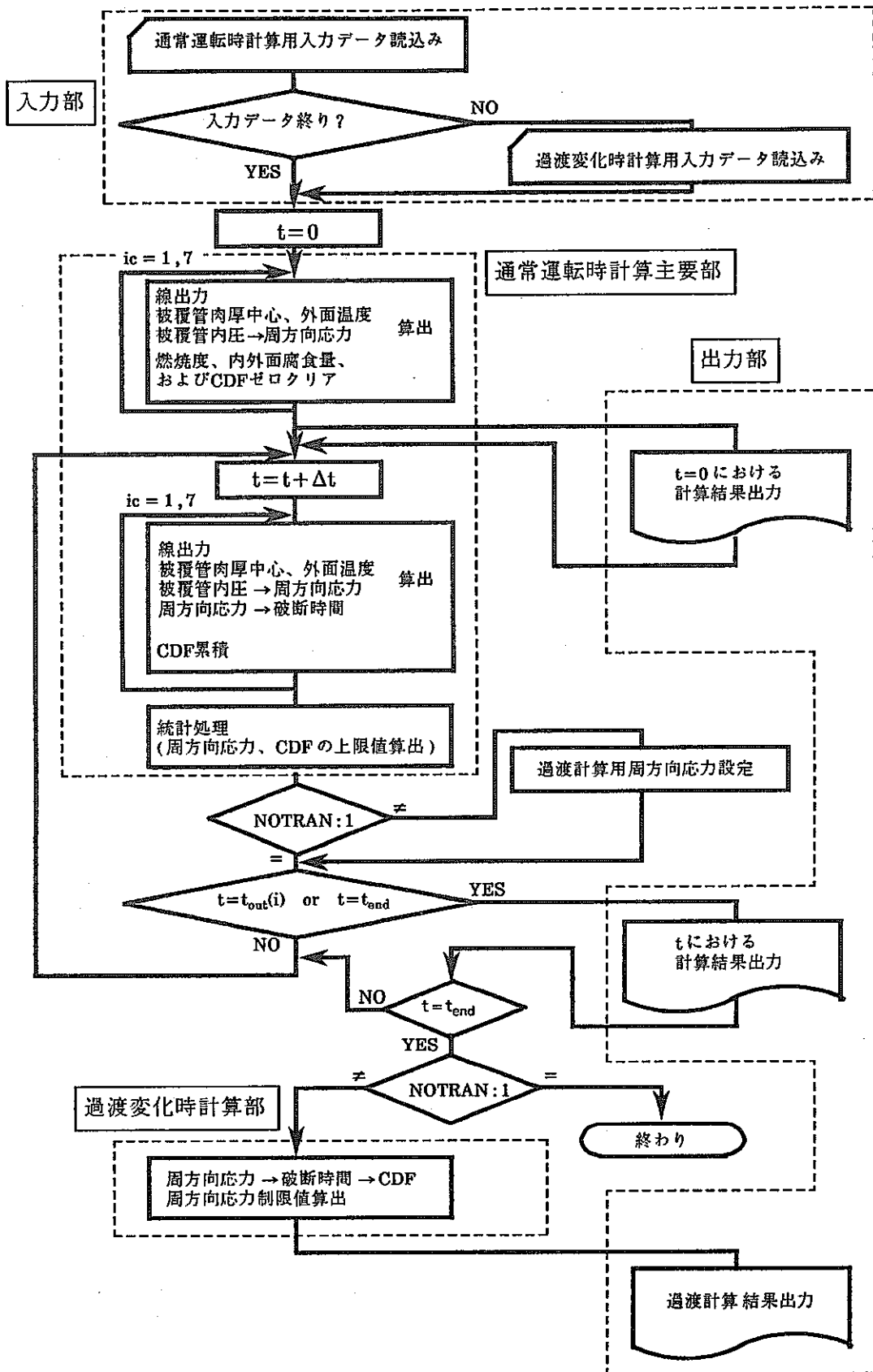
尚、現在のところは、改良オーステナイト鋼またはODS鋼製の被覆管材についてのみ評価可能だが、他の材質の諸物性式を組込むことによって、それらについても適用可能とできる。

(3) コードの構成

本コードの構成を図A.1に示す。尚、図中の各記号は次のような意味である。

t	通常運転時計算における各計算時刻点
Δt	計算時刻の刻み幅
$t_{out}(i)$	計算結果出力時刻点 ($i=1,2,3,\dots$)
t_{end}	寿命末期時刻点
ic	=1:基準計算、=2~7:各感度解析
NOTRAN	過渡変化時の計算を行うかどうかを判定するためのフラグ =1:過渡変化時の計算を行わない(通常運転時計算のみ) $\neq 1$:過渡変化時の計算を行う (NOTRANの値は過渡変化時計算用入力データの有無によりセットされる)

破断時間算出時の応力として、周方向応力を安全係数(0.8)で除した値を使用した場合の(すなわち、 S_t ベースでの)CDFと、周方向応力をそのまま使用した場合の(すなわち、 S_R ベースでの)CDFの2種を計算している。尚、内圧クリープ炉外試験データに基づき設定のクリープ破断時間式を用いる場合には、炉内強度劣化を補正する意味で、破断時間算出時の上記応力を0.7で除した値を使用している。この炉内強度劣化補正係数0.7は暫定値であり、将来、見直しが必要である。



図A.1. HOPE コードの構成

B 計算手法

B.1 HOPE-MCRコードシステムとの相違点

本コードは、時刻ゼロから寿命末期までを一定間隔ごとに分割した計算時刻点のそれぞれにおいて、基準計算と感度解析を行いその計算結果を印刷するとともに、その都度被覆管周方向応力とCDFの上限値を計算するものである。

本コードにおける計算手法の大部分はHOPE-MCRコードシステム⁷⁾の計算手法と類似である。HOPE-MCRコードシステムとの相違点を表B.1に示す。

表B.1 本コードとHOPE-MCRコードシステムの計算手法の相違点

	項目	HOPE-MCR	HOPE
1	計算時刻点の設定	予備計算を実施して、各時刻点を自動設定する。	全期間を一定間隔で分割した時刻と入力履歴点の全てを計算時刻とする。
2	サンプリング	13種類の確率変数をサンプリングする。	サンプリングは行わず、基準計算、感度解析を実施し、統計処理する。
3	軸方向出力分布	寿命期間中一定とする。	各入力履歴時刻ごとに与え、それぞれの計算時刻では、内挿する。
4	過渡計算	通常運転時用コードの出力ファイルをもとに、過渡計算用コードを使って実行する。	入力データに過渡履歴を追加して実行すると、通常運転時の計算と過渡計算を1回のランで同時に計算する。

これらの相違点を除けば、被覆管温度、FPガスによる被覆管内圧、燃焼度、被覆管内外面腐食、被覆管周方向応力、等の考え方はHOPE-MCRにおけるそれと基本的には同じである。

(B.4～B.8参照)

B.2 基準計算と感度解析

本コードにおいて基準計算、感度解析の対象となる項目は以下の通りである。

(1) 基準計算

被覆管肉厚、燃料ペレット径、炉心燃料スタック長の3項目の値を全てノミナル値とし、被覆管内面腐食、外面腐食、FPガス放出率の3項目を算出するための物性式としてノミナル式を用いる。

(2) 感度解析

(1)で挙げた6項目の内の1つだけを次のように変更して計算を行う。

- i) 感度解析1 被覆管肉厚を下限値とする
- ii) 感度解析2 燃料ペレット径を上限値とする
- iii) 感度解析3 炉心燃料スタック長を上限値とする
- iv) 感度解析4 被覆管内面腐食式として上限式を用いる
- v) 感度解析5 被覆管外面腐食式として上限式を用いる
- vi) 感度解析6 FPガス放出率式として上限式を用いる

尚、基準計算、感度解析を通じて、以下の諸条件は同一とされる。

- 燃料ペレット対理論密度比 ノミナル値
- 燃料ペレットPuO₂富化度 ノミナル値
- 被覆管外径 上限値
- 熱出力誤差 上限値
- 核計算誤差 上限値
- 被覆管外圧 一定値
- 下部有効ガスプレナム容積 一定値
- プレナム温度 一定値
- 被覆管熱伝導度式 ノミナル式
- 設計クリープ破断応力式 下限式

B.3 被覆管周方向応力、CDFの上限値計算

本コードでは、時刻ゼロから寿命末期までの各計算時刻点(運転期間を一定間隔ごとに分割した時刻点及び被覆管温度履歴の入力時刻点)において、基準計算と感度解析を行い、以下のような統計処理により各計算時刻点における被覆管周方向応力とCDFの上限値を求める。

- (1) ある計算時刻点 t_i における基準計算条件での被覆管周方向応力値 S_B 、感度解析条件での被覆管周方向応力値 $S_{S1}, S_{S2}, S_{S3}, \dots, S_{S6}$ を計算する。
- (2) t_i における被覆管周方向応力の上限値 S_E を次式にて計算する。

$$S_E = S_B + \left\{ \sum_{i=1}^6 (S_B - S_{Si})^2 \right\}^{1/2}$$

- (3) t_i における被覆管破断時間下限値 TR_E を周方向応力上限値 S_E を用いて計算する。
- (4) t_i におけるCDFの上限値 CDF_E を次式にて計算する。

$$CDF_E = CDF_0 + (t_i - t_{i-1}) \times (1/TR_0 + 1/TR_E)/2$$

- ここで、 t_{i-1} : 前回の計算時刻 (day)
 TR_0 : t_{i-1} における被覆管破断時間下限値 (day)
 CDF_0 : t_{i-1} におけるCDF上限値 (-)
 TR_E : t_i における被覆管破断時間下限値 (day)

尚、被覆管破断時間及びCDFは S_R ベース、 S_T ベースの2種類ずつ求める。

$$S_R \text{ ベース周方向応力} = \text{周方向応力} / r$$

$$S_T \text{ ベース周方向応力} = \text{周方向応力} / r / 0.8$$

B.4 被覆管温度

組込んだ内面腐食式(適用温度範囲: $\geq 600^\circ\text{C}$)が温度に依存しないので、内面温度は使用していない。

クリープ破断時間算出のために使用の肉厚中心温度 T_c (単位: $^\circ\text{C}$)は、次式で求めている。

$$T_c = (T_h - T_{in}) \times (L / L_{up}) + T_{in} \quad \dots\dots\dots (B-1)$$

- ここで、 T_h : 炉心上端部被覆管肉厚中心ホットスポット温度 ($^\circ\text{C}$)
 T_{in} : 冷却材入口温度 ($^\circ\text{C}$)
 L : 炉心燃料スタック軸長 (cm) (感度解析3の場合は上限値、その他の場合はノミナル値)
 L_{up} : 炉心燃料スタック軸長上限値 (cm)

被覆管外面腐食量算出のために使用する外面温度 T_o は次式で求めている。尚、温度が高いほど熱伝導度は増加するので、熱伝導度として肉厚中心ホットスポット温度 T_h に対応する値を用い、外面温度が保守側になるよう配慮している。

$$T_o = T_c - Q_n / 2\pi \times \ln(r_{on} / r_{in}) / k \quad \dots\dots\dots (B-2)$$

- ここで、 Q_n : 炉心上端部での線出力公称値 (W/cm)
 r_{on} : 被覆管外半径公称値 (mm)
 r_{in} : 被覆管肉厚中心半径公称値 (mm)
 k : 炉心上端部での被覆管熱伝導度 (W/cm \cdot $^\circ\text{C}$)

S_{m^*} 、 S_{y^*} はホットスポット温度ベースとノミナル温度ベースの2種の温度で算出している。

●ホットスポット温度ベース S_{m^*} 、 S_{y^*} 算出に使用する被覆管肉厚中心温度 T

$$T = T_h$$

●ノミナル温度ベース S_{m^*} 、 S_{y^*} 算出に使用する被覆管肉厚中心温度 T

$$T = (T_h - T_{in}) / \{(1 + QT/100) \times (1 + QL/100)\} \times (L / L_{up}) + T_{in}$$

尚、 S_u 、 S_y は対象としている計算時刻における温度 T を用いて算出し、短時間強度補正係数 r_{Su} 、 r_{Sy} はその計算時刻までの最大温度を使用して算出している。

過渡計算を実施する場合の過渡変化に起因するCDFの計算に用いる温度は、入力で与えた過渡時の被覆管肉厚中心温度ホットスポット値 $T_{h,TRAN}$ をそのまま使用する。

また、過渡変化中の S_{m^*} 、 S_{y^*} の計算において、 S_u 、 S_y の計算に用いる温度は $T_{h,TRAN}$ とし、 r_{Su} 、 r_{Sy} の計算に用いる温度は、その過渡変化発生時点までの通常運転時温度の最大値としている。

B.5 初期ガス圧

HOPE-MCRコードシステムと同様に次のような手法で計算される。

炉心燃料ペレットおよびブランケット燃料ペレットに含まれる蒸発性不純物は、運転開始直後に全てプレナム中に放出されるものとしており、被覆管初期ガス圧は、以下の式で求まる封入Heガスによる分圧(確定値)と、蒸発性不純物ガスによる分圧(確定値)の和としている。

●封入Heガスによる分圧 P_{HE}

$$P_{HE} = (V_{LP} + V_{GAP}) / V_{LP} \times (273.15 + T_{in}) / 293.15 \times P_{HE,20} \quad \text{----- (B-3)}$$

V_{LP} : 下部プレナム有効容積 (cm³)

V_{GAP} : ペレットと被覆管のギャップ部全容積 (cm³)

[尚、ギャップ部全容積は、被覆管外径が上限値、また、肉厚、ペレット外径、および燃料スタック長さがノミナル値の条件で計算している。]

T_{in} : プレナムガス温度(冷却材入口温度) (°C)

$P_{HE,20}$: ヘリウムガス封入圧力(封入時温度:20°C) (kg/cm²)

●蒸発性不純物ガスによる分圧 P_{TRP}

$$P_{TRP} = (G_f \cdot M_f + G_b \cdot M_b) / 1000 / V_{LP} \times (273.15 + T_{in}) / 293.15 \times P_{HE,20} \dots\dots\dots (B-4)$$

G_f : 炉心燃料ペレットに含まれる蒸発性不純物量 ($\mu\ell/g\text{-oxide}$)

M_f : 炉心燃料ペレット総重量 ($g\text{-oxide}$)

$$M_f = \{0.48 \times PU_n + 10.96 - 2.5 \times (2 - OM_n)\} \times \rho_n / 100 \times V_{f,n}$$

PU_n : PuO₂富化度ノミナル値 (-)、 OM_n : O/M比ノミナル値 (-)、

ρ_n : 対理論密度比ノミナル値 (%TD)、

$V_{f,n}$: 炉心燃料全体積ノミナル値 (cm^3)

G_b : ブランケット燃料ペレットに含まれる蒸発性不純物量 ($\mu\ell/g\text{-oxide}$)

M_b : ブランケット燃料ペレット総重量 ($g\text{-oxide}$)

$$M_b = 10.96 \times 0.95 \times V_b, \quad V_b: \text{ブランケット燃料全体積ノミナル値 } (cm^3)$$

B.6 FPガスによる分圧

燃焼が進んだ時期での被覆管ガス圧は、B.5節に計算方法を示した初期ガス圧に、FPガスによる分圧が加わる。このFPガスによる分圧は、以下に示した式で計算される炉心部からのFPガスによる分圧(基準解析、感度解析により異なる)と、ブランケット部からのFPガスによる分圧(ケースによらず一定)の和として求めている。

●炉心部からのFPガスによる分圧 P_{core} (kgf/cm^2)

$$P_{core} = FP_{core} \times RFP \times 8.3143 \times 10^7 / 9.80665 \times 10^5 / V_{LP} \times (273.15 + T_{in}) \dots\dots\dots (B-5)$$

FP_{core} : 炉心部FPガス生成量 (mol)

RFP : 炉心燃料ペレットのFPガス放出率(cf. 第3.1節) (-)

8.3143×10^7 : 気体定数 ($dyn\text{-cm/mol}\cdot K$)

9.80665×10^5 : 力の単位換算係数 (dyn/kg)

V_{LP} : 下部プレナム有効容積 (cm^3)

T_{in} : プレナムガス温度 ($^{\circ}C$)

式(B-5)右辺におけるFPガス生成量 FP_{core} (mol)は、次式で算出している。

$$FP_{core} = FP_{core,n} \times (1 + QT/100) \times (1 + QL/100) \times (L/L_n) \times (\rho/\rho_n) \times (DP/DP_n)^2 \times (PU/PU_n) \quad \dots\dots (B-6)$$

- FP_{core,n} : 炉心部FPガス生成量ノミナル値(cf.式(B-7))
- QT : 熱出力誤差 (%)
- QL : 核計算誤差 (%)
- L : 炉心燃料スタック軸長 (cm)
- ρ : 対理論密度比 (%TD)
- DP : ペレット外径 (mm)
- PU : PuO₂富化度 (-)

$$FP_{core,n} = U_n \times N_{fiss} / 6.0225 \times 10^{23} / (E_{fiss} \times 1.6021 \times 10^{-13}) \quad \dots\dots (B-7)$$

- U_n : ノミナル線出力条件での積算発熱量 (joule)
- N_{fiss} : 核分裂当たりのFPガス生成原子数 (atoms/fission)、
[コード内デフォルト値:0.27]
- 6.0225×10²³ : アボガドロ数 (atoms/mol)
- E_{fiss} : 核分裂当たりの生成エネルギー (Mev/fission)、
[コード内デフォルト値:200]
- 1.6021×10⁻¹³ : エネルギーの単位換算係数 (joule/Mev)

●ブランケットからのFPガスによる分圧P_{blanket}(kg/cm²)

$$P_{blanket} = FP_{blanket} \times 0.1 \times 8.3143 \times 10^7 / 9.80665 \times 10^5 / V_{LP} \times (273.15 + T_{in}) \quad \dots\dots (B-8)$$

- FP_{blanket} : ブランケット部FPガス生成量 (mol)
- 0.1 : ブランケット部FPガス放出率、上限値相当 (-)

尚、ブランケット部FPガス生成量算出には線出力公称値を使用している。

B.7 燃焼度

被覆管内面腐食量を計算する際に必要な、炉心上端部ノードにおける局所燃焼度は、炉心燃料スタック部全長に関する平均燃焼度に一定の比率(線出力軸方向分布からコード内で求めた

値)を乗じて求めている。この平均燃焼度は、FPガス放出率を算出する際にも必要であり、以下のようにして求めた近似式(B-9)を用いて算出している。

平均燃焼度BURN (MWD/MTM)は次式で与えられる。

$$BURN = U / (3600 \times 24 \times 10^6) / (V_{f,n} \times \rho_{th} \times \rho / 100 \times R_{mass} \times 10^{-6}) \quad \dots\dots\dots (B-9)$$

ここで、

$$U = U_n \times (1 + QT/100) \times (1 + QL/100) \times (L/L_n) \times (\rho/\rho_n) \times (DP/DP_n)^2 \times (PU/PU_n)$$

U_n : ノミナル線出力条件の積算発熱量 (joule)

$$V_{f,n} = \pi \times L \times DP^2 / 4$$

$V_{f,n}$: 炉心燃料ペレット全体積ノミナル値 (cm³)

$3600 \times 24 \times 10^6$: jouleからMWDへの換算係数

ρ_{th} : 炉心燃料ペレット理論密度 (g/cm³)

R_{mass} : 炉心燃料ペレット金属重量比 (金属重量/全重量)

ペレット理論密度 ρ_{th} 、および金属重量比 R_{mass} として、PuO₂ 富化度、および O/M 比の公称値(PU_n および OM_n)を用いて

$$\rho_{th} = 0.48 \times PU_n + 10.96 - 2.5 \times (2 - OM_n)$$

$$R_{mass} = \{244 \times PU_n + 238 \times (1 - PU_n)\} / \{244 \times PU_n + 238 \times (1 - PU_n) + 16 \times OM_n\}$$

にて求まる値で近似するならば、式(B-9)は、燃焼度ノミナル値 BURN_nを用いた式(B-9)で表される。

$$BURN = BURN_n \times (1 + QT/100) \times (1 + QL/100) \times (PU/PU_n) \quad \dots\dots\dots (B-9)$$

ここで、

$$BURN_n = U_{f,n} / (3600 \times 24 \times 10^6) / (V_{f,n} \times \rho_{th} \times \rho_n / 100 \times R_{mass} \times 10^{-6}) \quad \dots\dots\dots (B-10)$$

B.8 被覆管周方向応力

通常運転時の炉心上端部での被覆管周方向膜応力 σ_{θ} (kg/mm²)は、通常行われるように薄肉近似を適用することで得られる式(平均径の式)で算出している。

$$\sigma_{\theta} = (P_{in,s} - P_{out}) \times (r_0 + r_i) / (r_0 - r_i) / 200 \quad \dots\dots (B-11)$$

P_{in} : 被覆管内圧 (kg/cm²)

P_{out} : 被覆管外圧 (kg/cm²)

r_0 : 外面腐食を考慮した被覆管外半径 (mm)

$$r_0 = DC / 2 - \Sigma(CR \cdot \Delta t) \times 10^{-3}$$

DC: 被覆管外径 (mm)

CR: 被覆管外面腐食率(cf. 第3.2節) ($\mu\text{m}/\text{year}$)

Δt : 時分割刻み巾 (year)

r_i : 内面腐食を考慮した被覆管内半径 (mm)

$$r_i = DC / 2 - TH + CFP \times 10^{-3}$$

TH: 被覆管肉厚 (mm)

CFP: 被覆管内面腐食量(cf. B.3節) (μm)

過渡変化時のCDF計算を行う場合に使用する周方向膜応力は、過渡時にて、ガスプレナム温度(冷却材入口温度)の上昇、およびFPガス放出率の増加が生じないことを前提とし、過渡変化を想定する時刻点に最も近い計算時刻点における通常運転時の周方向膜応力値とする。

(ここで言う最も近い計算時刻点とは厳密に言うと過渡変化を想定する時刻点と同一の計算時刻点か、またはそれを初めて越えた計算時刻点のことである。)

C 物性式

本コードに組込んだ物性式は、表C.1に示した9項目である。これらの物性式で用いる定数の値は、入力データで変更可能である。また、被覆管ヤング率相対値の計算式及び過渡変化時における設計クリープ破断強度式の2項目は、CDF過渡計算を実施しない時は使用しない。

表C.1 HOPEコード内で定義している物性式

	物性式	定義ルーチン	現在定義されている物性式の数
1	被覆管内面腐食(FCCI)量	FCCI	1
2	被覆管外面腐食(Na腐食)量	CRNA	2
3	炉心燃料ペレットからのFPガス放出率	GASRLS	1
4	通常運転時計算における設計クリープ破断強度	TRNOML	2
5	被覆管熱伝導度	HCOND	2
6	設計引張り強さ S_u	FUNSU	2
7	設計降伏点 S_y	FUNSY	2
8	被覆管ヤング率相対値	FUNYNG	2
9	過渡計算における設計クリープ破断強度	TRTRAN	3

C.1 被覆管内面腐食(FCCI)量

①SUS316材(PNC改良オーステナイト鋼、ODS鋼も同じ式を使用する。) (NOEQ(1) = 1)

i) $B \leq 15000$ (MWD/MTM) の時

$$C_{FP} = P / 10^4$$

ii) $15000 < B \leq 60000$ (MWD/MTM) の時

$$C_{FP} = (P + 65 \times (B - 15000) / (60000 - 15000)) / 10^4$$

iii) $B > 60000$ (MWD/MTM) の時

$$C_{FP} = (P + 65) / 10^4$$

ここで、

B	: 局所燃焼度 (MWD/MTM)
C _{FP}	: 外面腐食量 (cm)
P	= -35 下限式の場合
	= 0 ノミナル式の場合
	= 35 上限式の場合

C.2 被覆管外面腐食(Na腐食)量

①PNC改良オーステナイト鋼 (NOEQ(2) = 1)

$$C_R = P \times \exp(-1.647 \times 10^4 / (T + 273.0)) \times (6.9772 / 6.9772) \times 3.0$$

$$D = C_R \times (t_2 - t_1) / (365 \times 10^4)$$

P = 2.280 × 10 ⁸	.....	下限式の場合
= 4.118 × 10 ⁸	.....	ノミナル式の場合
= 5.956 × 10 ⁸	.....	上限式の場合

②ODS鋼 (NOEQ(2) = 2)

式は①と同じ、ただしPの値は次のようになる。

P = 1.887 × 10 ⁸	.....	下限式の場合
= 3.407 × 10 ⁸	.....	ノミナル式の場合
= 4.927 × 10 ⁸	.....	上限式の場合

なお、①,②における記号の意味は次のようである。また、鋼中の酸素濃度はデフォルトでは3ppmとしている。

C _R	: 内面腐食率 (μm/year)
t ₁	: 時刻1 (day)
t ₂	: 時刻2 (day)
D	: 時刻1と時刻2の間の腐食量 (cm)
T	: 時刻1、時刻2間の被覆管外面温度平均値 (°C)

C.3 炉心燃料ペレットからのFPガス放出率 (NOEQ(3) = 1)

i) $B \leq 20 (\times 10^4 \text{MWD/MTM})$ の時

$$R_{FP} = \max\{P - (90/20^6) \times (20 - B)^6, 0\}$$

ii) $B > 20 (\times 10^4 \text{MWD/MTM})$ の時

$$R_{FP} = P$$

ここで、

B	: 炉心部平均燃焼度 ($\times 10^4$ MWD/MTM)
R _{FP}	: FPガス放出率 (%)
P	= 80 下限式の場合
	= 90 ノミナル式の場合
	= 100 上限式の場合

C.4 通常運転時計算における設計クリーブ破断強度

①PNC改良オーステナイト鋼 (NOEQ(4) = 1)

$$\log_{10} t_R = P + F(S_R) \times 10^3 / (T + 273) - 22.26$$

i) $15 \leq S_R$ の時

$$F(S_R) = 13.668 + 23.881 \cdot \log_{10} S_R - 11.375 \cdot (\log_{10} S_R)^2$$

ii) $2 \leq S_R < 15$ の時

$$F(S_R) = 29.402 - 2.875 \cdot \log_{10} S_R$$

P	= -0.71568 下限式の場合
	= 0.0 ノミナル式の場合
	= 0.71568 上限式の場合

②ODS鋼 (NOEQ(4) = 2)

$$\log_{10} t_R = F(S_R) \times 10^3 / (T + 273) - 32.0$$

$$F(S_R) = P - 25.88 \cdot \log_{10} S_R$$

P = 68.05 下限式、ノミナル式、上限式共通

ここで、

S _R	: 被覆管周方向応力
F(S _R)	: S _R の関数
T	: 被覆管肉厚中心温度 (°C)
t _R	: 破断時間 (hour)

C.5 被覆管熱伝導度

①PNC改良オーステナイト鋼 (NOEQ(5) = 1)

$$K = 0.132 + P \cdot T$$

P = 1.3×10^{-4} 下限式、ノミナル式、上限式共通

②ODS鋼 (NOEQ(5) = 2)

$$K = 0.246 + P \cdot T$$

$$P = 4.3 \times 10^{-5} \dots\dots\dots \text{下限式、ノミナル式、上限式共通}$$

ここで、
 K : 熱伝導度 (W/cm·c)
 T : 温度 (°C)

C.6 設計引張り強さ S_u

①PNC改良オーステナイト鋼 (NOEQ(6) = 1)

$$S_u = 1.4514 \times 10^{-15} \cdot T^6 - 2.0842 \times 10^{-12} \cdot T^5 + 1.8296 \times 10^{-11} \cdot T^4$$

$$+ 9.3527 \times 10^{-7} \cdot T^3 - 3.5152 \times 10^{-4} \cdot T^2 + 1.7529 \times 10^{-3} \cdot T + P$$

$$P = 69.1029 \dots\dots\dots \text{下限式、ノミナル式、上限式共通}$$

②改良SUS316材(ODS鋼の場合もこれを使用) (NOEQ(6) = 2)

$$S_u = 2.2884 \times 10^{-15} \cdot T^6 - 5.2033 \times 10^{-12} \cdot T^5 + 4.4633 \times 10^{-9} \cdot T^4$$

$$- 2.0880 \times 10^{-6} \cdot T^3 + 6.1803 \times 10^{-4} \cdot T^2 - 1.2312 \times 10^{-1} \cdot T + P$$

$$P = 71.601 \dots\dots\dots \text{下限式、ノミナル式、上限式共通}$$

ここで、
 S_u : 設計引張り強さ (kgf/mm²)
 T : 温度 (°C)

C.7 設計降伏点 S_y

①PNC改良オーステナイト鋼 (NOEQ(7) = 1)

$$S_y = 4.7719 \times 10^{-16} \cdot T^6 - 7.4888 \times 10^{-14} \cdot T^5 - 1.3510 \times 10^{-9} \cdot T^4$$

$$+ 1.2849 \times 10^{-6} \cdot T^3 - 3.9602 \times 10^{-4} \cdot T^2 + 1.5524 \times 10^{-2} \cdot T + P$$

$$P = 58.4418 \dots\dots\dots \text{下限式、ノミナル式、上限式共通}$$

②改良SUS316材(ODS鋼の場合もこれを使用) (NOEQ(7) = 2)

$$S_y = 3.0165 \times 10^{-15} \cdot T^6 - 7.2715 \times 10^{-12} \cdot T^5 + 6.6710 \times 10^{-9} \cdot T^4$$

$$- 3.1503 \times 10^{-6} \cdot T^3 + 8.2771 \times 10^{-4} \cdot T^2 - 1.3293 \times 10^{-1} \cdot T + P$$

$$P = 64.303 \dots\dots\dots \text{下限式、ノミナル式、上限式共通}$$

ここで、
 S_y : 設計降伏点 (kgf/mm²)
 T : 温度 (°C)

C.8 被覆管ヤング率相対値 E_R

①PNC改良オーステナイト鋼 (NOEQ(8) = 1)

i) $T \leq 650$ (°C) の時

$$E_T = -10.125 \cdot T + 2.126 \times 10^4$$

ii) $650 < T \leq 850$ (°C) の時

$$E_T = 3.7656 \times 10^{-6} \cdot T^3 - 9.3538 \times 10^{-3} \cdot T^2 - 3.2761 \cdot T + 1.9731 \times 10^4$$

iii) $T > 850$ (°C) の時

$$E_T = -11.015622 \cdot T + P$$

であり、

$$E_R = E_{750} / E_T$$

$$P = 2.18640223 \times 10^4 \quad \dots\dots\dots \text{下限式、ノミナル式、上限式共通}$$

②ODS鋼 (NOEQ(8) = 2)

i) $T < 750$ (°C) の時

$$E_T = -1.170 \times 10^{-5} \cdot T^3 + 2.444 \times 10^{-3} \cdot T^2 - 5.583 \cdot T + 2.2736 \times 10^4$$

iii) $T \geq 750$ (°C) の時

$$E_T = -21.661 \cdot T + P$$

であり、

$$E_R = E_{750} / E_T$$

$$P = 3.1233 \times 10^4 \quad \dots\dots\dots \text{下限式、ノミナル式、上限式共通}$$

ここで、
 T : 温度 (°C)
 E_R : 750°Cにおけるヤング率に対する温度 T におけるヤング率の相対値 (-)
 E_T : 温度 T におけるヤング率 (kgf/mm²)
 E_{750} : 750°Cにおけるヤング率 (kgf/mm²)

C.9 過渡計算における設計クリーブ破断強度

①PNC改良オーステナイト鋼 (NOEQ(9) = 1)

通常運転計算時と同じ式を用いる場合の計算も可能としている。 (cf. C.4)

②改良SUS316材 (NOEQ(9) = 2)

$$\begin{aligned} \text{LMP} &= (T + 273.15)(22.2 + \log_{10} t_R) \times 10^{-3} \\ &= 31.737 + P - 16.339 \cdot \log_{10} \sigma_m + 17.756 \cdot (\log_{10} t_R)^2 - 7.6614 \cdot (\log_{10} t_R)^3 \end{aligned}$$

$$\sigma_m = \sigma_T \cdot E_R$$

$$\begin{aligned} P &= -3.213 && \text{..... 下限式の場合} \\ &= 0 && \text{..... ノミナル式の場合} \\ &= 3.213 && \text{..... 上限式の場合} \end{aligned}$$

ここで、

T	: 温度 (°C)
t _R	: 破断時間 (hour)
LMP	: Larson-Mirror-Parameter
σ _T	: 被覆管周方向応力 (kgf/mm ²)
σ _m	: E _R で補正した被覆管周方向応力 (kgf/mm ²)
E _R	: 750°Cにおけるヤング率に対する温度Tにおけるヤング率の相対値 (-)

③ODS鋼 (NOEQ(9) = 3)

通常運転計算時と同じ式を用いる。 (cf. C.4)

C.10 短時間強度(引張り強度)

本コードでは、全てのCDF計算時刻点において、C.6、C.7で算出したS_u、S_yを用いて、次式で定義される設計応力強さS_m*と、設計降伏点S_y*を計算する。

$$S_m^* = \text{Min}\{1/2 \times S_u^*, 3/4 \times S_y^*\} \quad , \quad S_u^* = r_{S_u} \cdot S_u, \quad S_y^* = r_{S_y} \cdot S_y$$

短時間強度補正係数r_{S_u}およびr_{S_y}は、現在のところ、表C.2に示した改良SUS316鋼用の係数を全ての場合に適用している。

表C.2 改良SUS316鋼用短時間強度補正係数 (現在のところは他の材質にも適用している)

温度 (°C)	r_{S_u}	r_{S_y}	温度 (°C)	r_{S_u}	r_{S_y}
-30 ~ 450	1.00	1.00	600	0.78	0.71
475	1.00	0.93	625	0.74	0.70
500	0.96	0.85	650	0.70	0.69
525	0.91	0.80	675	0.66	0.68
550	0.87	0.76	700	0.63	0.67
575	0.82	0.73			

尚、本コードでは S_m^* 、 S_y^* として、ホットスポット温度ベースとノミナル温度ベースの各2種類を算出する。 S_u と S_y を算出するための温度は、各計算時刻点における被覆管肉厚中心ホットスポット温度及びノミナル温度を用い、 r_{S_u} および r_{S_y} を算出するための温度は、その計算時刻点までの被覆管肉厚中心ホットスポット温度及びノミナル温度の最大値を使用している。

D 入力データ

HOPEの入力データは、書式付き形式1、2とネームリスト形式の3種類からなる。書式付きデータ1は常に入力が必要である。一方、ネームリストデータは、コード内でデフォルト値を持っており、必ずしも入力する必要はない。また、過渡計算を実施する場合はネームリストデータの直後に書式付きデータ2を入力する。尚、第一カラムにアスタリスク「*」を入力すると、そのカードはコメントカードとして扱われる。

以下に、入力データ作成方法詳細を記す。カッコ[]内は、制限条件を示す。

(1) 書式付き入力データ1

# 1		NTBL	I10
	NTBL	線出力と温度の履歴点数 [≦10]	
# 2		TIMTBL(I),I=1,NTBL	7F10.0
	TIMTBL(I)	履歴時刻 (day)	
# 3		PWRTBL(I),I=1,NTBL	7F10.0
	PWRTBL(I)	公称ピーク線出力履歴 (W/cm)	
# 4		TCTBL(I),I=1,NTBL	7F10.0
	TCTBL(I)	炉心上端部の被覆管肉厚中心ホットスポット温度履歴 (°C)	
# 5		NLBL,NCORE,NUBL	3I10
	NLBL	下部ブランケット部軸方向分割数	
	NCORE	炉心部軸方向分割数	
	NUBL	上部ブランケット部軸方向分割数	
		[NZ=NLBL+NCORE+NUBL≦50]	
# 6		ZLEN(I),I=1,NZ	7F10.0
	ZLEN(I)	軸方向各ノードの長さ (cm)	

注) 局所燃焼度の観点で、炉心上端部のノード長は短い方が良い。

# 7		RPWR(I,J),I=1,NZ,J=1,NTBL	7F10.0
	RPWR(I,J)	軸方向各ノードの、各履歴時刻における出力分布(相対値) (-)	
# 8		RHON,RHOU,PUN,PUU,OM,CDIAON,CDIAOU	7F10.0
	RHON	燃料ペレット対理論密度比ノミナル値 (%TD)	
	RHOU	燃料ペレット対理論密度比上限値 (%TD)	
	PUN	燃料ペレットPuO ₂ 富化度ノミナル値 (-)	
	PUU	燃料ペレットPuO ₂ 富化度上限値 (-)	
	OM	燃料ペレットO/M比 (-)	
	CDIAON	被覆管外径ノミナル値 (mm)	
	CDIAOU	被覆管外径上限値 (mm)	
# 9		QTERR,QLERR	2F10.0
	QTERR	熱出力誤差 (%)	
	QLERR	核計算誤差 (%)	
# 10		PRHE,PRCLDO,GSIMPF,GSIMPB,VLP,TIN	6F10.0
	PRHE	製作時Heガス封入圧力 (kgf/cm ²)	
	PRCLDO	運転時燃料被覆管外圧 (kgf/cm ²)	
	GSIMPF	炉心燃料ペレットに含まれる蒸発性不純物量 (μℓ/g-oxide)	
	GSIMPB	ブランケットに含まれる蒸発性不純物量 (μℓ/g-oxide)	
	VLP	下部ガスプレナム容積 (cm ³)	
	TIN	冷却材入口温度(プレナムガス温度) (°C)	
# 11		THICKN,THICKL	2F10.0, I10
	THICKN	被覆管肉厚ノミナル値 (mm)	
	THICKL	被覆管肉厚下限値 (mm)	

# 12		FDIAON ,FDIAOU	2F10.0, I10
	FDIAON	燃料ペレット径ノミナル値 (mm)	
	FDIAOU	燃料ペレット径上限値 (mm)	
# 13		STACKN ,STACKL	2F10.0, I10
	STACKN	炉心燃料スタック長ノミナル値 (cm)	
	STACKL	炉心燃料スタック長下限値 (cm)	

(2) ネームリスト形式入力データ

ネームリスト名はOPTDATであり、以下の形式で入力する。

&OPTDAT a=1.0,b=2.0, ,&END

- &OPTDATは必ず2カラム目から入力し、&OPTDATの直後には空白を入れる事。
- データ間はカンマで区切る。複数行に渡っても差し支えない。
- a,bは下記に記載するFORTRAN変数名である。

変数名	デフォルト値	内容
ATMFIS	0.27	核分裂当たりのガス原子生成数 (atoms/fission)
ENGFIS	200.0	核分裂当たりの発生エネルギー (Mev/fission)
STSR	0.8	S _R ベース応力→S _t ベース応力への換算係数 (-)
GAMMA	0.7	炉内環境効果によるクリープ強度劣化係数 (-)
DTNML(1)	1.0	通常運転計算における計算時刻間隔 (day)
DTNML(2)	10.0	通常運転計算における計算結果の内、感度解析結果のテーブルを印刷する時刻間隔 (day)
DTNML(3)	10000.0	通常運転計算における計算結果の内、ショートアウトプットを印刷する時刻間隔 (day)
DTTRN(1)	0.05	過渡計算における計算時刻間隔 (day)
DTTRN(2)	0.5	過渡計算における計算結果を印刷する時刻間隔 (day)

NOEQ(K)	(4) 参照	K番目の項目(下記)の物性式について使用する物性式の番号 K= 1 内面腐食(FCCI)式 2 外面腐食(Na腐食)式 3 炉心燃料ペレットからのFPガス放出率式 4 通常運転計算で使用するクリープ破断強度式 5 被覆管熱伝導度式 6 設計引張り強さ S_u 式 7 設計降伏応力 S_y 式 8 被覆管のヤング率相対値の計算式 9 過渡計算で使用するクリープ破断強度
PARA(I,K)	(4) 参照	K番目の項目の物性式においてI番目の係数の値をデフォルト値と異なる値にする場合に入力する
PRMIN(K)	なし	K番目の項目の物性式の <u>下限式</u> の係数の値をデフォルト値と異なる値にする場合に入力する
PRNOMI(K)	なし	K番目の項目の物性式の <u>ノミナル式</u> の係数の値をデフォルト値と異なる値にする場合に入力する
PRMAX(K)	なし	K番目の項目の物性式の <u>上限式</u> の係数の値をデフォルト値と異なる値にする場合に入力する

(3) 書式付き入力データ2

# 1'	NTIMET	I10
NTIMET	過渡変化履歴時刻数 [≤10]	
# 2'	TIMET(I), NPAT(I), I=1, NTIMET	F10.0, I10
TIMET(I)	過渡変化を想定する時刻 (day)	
NPAT(I)	時刻TIMET(I)にて与える過渡履歴のパターン数 (-)	
	カード#2' はNTIMET枚入力する	
# 3'	NPOINT(J), J=1, NPAT(I)	I10
NPOINT(J)	時刻TIMET(I)、過渡履歴パターンJの過渡変化データ数 (-)	
	カード#3' はカード#2' の各Iに対してNPAT(I)枚入力する	
# 4'	TTIME(K, J, I), K=1, NPOINT(J, I)	F10.0
TTIME(K, J, I)	時刻TIMET(I)、過渡履歴パターンJの各時刻点 (sec)	

#5'

TTEMP(K,J,I),K=1,NPOINT(J,I)

F10.0

TTEMP(K,J,I) 各時刻点TTEMP(K,J,I)における被覆管温度 (°C)

カード#4' ,#5' はカード#3' の各Jに対してそれぞれ入力する。

(4) 物性式関係の入力データに関する注意事項

HOPEコードを使用する際には、物性式関係のデータについて次のような点について注意しなければならない。

- ① 各項目の物性式ごとの使用する物性式番号 (NOEQ (K), K=1, 9にて指定する) のデフォルト値は、表D.1の通りである。

表D.1 各項目の物性式ごとの番号(NOEQ (K))

No.	変数名	物性式の項目	デフォルト値	現在指定可能な番号
1	NOEQ (1)	被覆管内面腐食(FCCI)量	1	1のみ
2	NOEQ (2)	被覆管外面腐食(Na腐食)量	1	1または2
3	NOEQ (3)	炉心燃料ペレットからのFPガス放出率	1	1のみ
4	NOEQ (4)	通常運転時計算における設計クリーブ破断強度	1	1または2
5	NOEQ (5)	被覆管熱伝導度	1	1または2
6	NOEQ (6)	設計引張り強さ S_u	1	1または2
7	NOEQ (7)	設計降伏点 S_y	1	1または2
8	NOEQ (8)	被覆管ヤング率相対値	1	1または2
9	NOEQ (9)	過渡計算における設計クリーブ破断強度	2	1または2

- ② 物性式の係数データは、3次元の配列変数 PARM (I, J, K) に表D.2～D.10に示した値が格納されており、これらのデータをNOEQ (K) の値に応じて、2次元配列 PARA (I, K) に転送した後に使用される。

表D.2 PARM(I, J, K) (被覆管内面腐食(FCCI)量式の係数)

J	I									
1	1	2	3	4	5	6	7~20			
	1.5D4	6.0D4	65.0D0	-35.0D0	0.0D0	35.0D0	0.0D0			

表D.3 PARM(I, J, 2) (被覆管外面腐食(Na腐食)量式の係数)

J	I									
1	1	2	3	4	5	6	7	8~20		
	-1.647D4	6.9772D0	6.9772D0	3.0D0	2.280D8	4.118D8	5.956D8	0.0D0		
2	1	2	3	4	5	6	7	8~20		
	-1.647D4	6.9772D0	6.9772D0	3.0D0	1.887D8	3.407D8	4.927D8	0.0D0		

表D.4 PARM(I, J, 3) (炉心燃料ペレットからのFPガス放出率式の係数)

J	I									
1	1	2	3	4	5	6	7~20			
	20.0D0	90.0D0	6.0D0	80.0D0	90.0D0	100.0D0	0.0D0			

表D.5 PARM(I, J, 4) (通常運転時計算における設計クリープ破断強度式の係数)

J	I									
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	273.0D0	-22.26D0	15.0D0	-11.875D0	23.881D0	13.668D0	-2.875D0	29.4018D0	-0.47712D0	0.0D0
1	11	12~20								
	0.47712D0	0.0D0								
2	1	2	3	4	5	6	7~20			
	273.0D0	-32.0D0	-25.88D0	68.05D0	68.05D0	68.05D0	0.0D0			

表D.6 PARM(I, J, 5) (被覆管熱伝導度式の係数)

J	I									
1	1	2	3	4	5~20					
	0.132D0	1.3D-4	1.3D-4	1.3D-4	0.0D0					
2	1	2	3	4	5~20					
	0.246D0	4.3D-5	4.3D-5	4.3D-5	0.0D0					

表D.7 PARM(I, J, 6) (設計引張り強さ S_u 式の係数)

J	I										
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10~20	
	1.4514D-15	-2.0842D-12	1.8296D-11	9.9527D-7	-3.5152D-4	1.7529D-3	69.1029D0	69.1029D0	69.1029D0	0.0D0	
2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10~20	
	2.2884D-15	-5.2033D-12	4.4633D-9	-2.0880D-6	6.1803D-4	-1.2312D-1	71.601D0	71.601D0	71.601D0	0.0D0	

表D.8 PARM(I, J, 7) (設計降伏点 S_y 式の係数)

J	I										
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10~20	
	4.7719D-16	-7.4888D-14	-1.9510D-9	1.2849D-6	-3.9602D-4	1.5524D-2	58.4418D0	58.4418D0	58.4418D0	0.0D0	
2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10~20	
	3.0165D-15	-7.2715D-12	6.6710D-9	-3.1503D-6	8.2771D-4	-1.3293D-1	64.303D0	64.303D0	64.303D0	0.0D0	

表D.9 PARM(I, J, 8) (被覆管ヤング率相対値式の係数)

J	I										
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	650.0D0	850.0D0	3.7656D-6	-9.9538D-3	-3.2761D0	1.9731D4	2.126D4	-10.125D0	-1.10156D1	2.186402D4	
1	11	12	13~20								
	2.186402D4	2.186402D4	0.0D0								
2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10~20	
	750.0D0	-1.170D-5	2.444D-3	-5.583D0	2.2736D4	-2.1661D1	3.1233D4	3.1233D4	3.1233D4	0.0D0	

表D.10 PARM(I, J, 9) (過渡計算における設計クリープ破断強度式の係数)

J	I									
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	273.0D0	-22.26D0	15.0D0	-11.375D0	23.881D0	13.668D0	-2.875D0	29.4018D0	-0.47712D0	0.0D0
1	11	12~20								
	0.47712D0	0.0D0								
2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10~20
	273.15D0	-22.2D0	-7.6614D0	17.576D0	-16.339D0	31.737D0	-2.142D0	0.0D0	2.142D0	0.0D0

HOPEコード入力例(通常運転時計算、過渡変化時計算の両方を実施)

* DETERMINISTIC CALC. DATA FOR AST STEEL CORE							←注釈カード
* CASE 3 (PLENUM VOLUME = 45 CC)						1990.3.27	←注釈カード
*							←注釈カード
6							←カード#1
0.0	456.0000	456.0001	912.0000	912.0001	1368.0000		←カード#2
390.0	430.0	375.0	415.0	365.0	405.03		←カード#3
656.0	700.0	646.0	690.0	637.0	681.0		←カード#4
1	9	1					←カード#5
20.0	5.0	15.0	15.0	10.0	10.0	10.0	←カード#6
15.0	15.0	5.0	20.0				
* TIME 1							←注釈カード
0.131	0.538	0.710	0.892	0.977	1.000	0.977	←カード#7
0.892	0.710	0.538	0.131				
* TIME 2							←注釈カード
0.131	0.538	0.710	0.892	0.977	1.000	0.977	
0.892	0.710	0.538	0.131				
* TIME 3							←注釈カード
0.131	0.538	0.710	0.892	0.977	1.000	0.977	
0.892	0.710	0.538	0.131				
* TIME 4							←注釈カード
0.131	0.538	0.710	0.892	0.977	1.000	0.977	
0.892	0.710	0.538	0.131				
* TIME 5							←注釈カード
0.131	0.538	0.710	0.892	0.977	1.000	0.977	
0.892	0.710	0.538	0.131				
* TIME 6							←注釈カード
0.131	0.538	0.710	0.892	0.977	1.000	0.977	
0.892	0.710	0.538	0.131				
92.0	93.333	0.154	0.158	1.98	8.30	8.30	←カード#8
2.0	5.0						←カード#9
1.03	1.50	180.0	50.0	45.0	375.0		←カード#10
0.45	0.42						←カード#11
7.22	7.2533						←カード#12
100.0	100.5						←カード#13
&OPTDAT							←ネームリスト
	DTNML(3)=500.000,						カード
&END							
1							←カード#1'
1368.0000	1						←カード#2'
8							←カード#3'
0.0	0.5	1.0	1.4	1.8	2.4	5.0	←カード#4'
10.0							
700.0	710.0	740.0	745.0	750.0	750.0	730.0	←カード#5'
700.0							

E ジョブ制御文

HOPEコード実行JCL例

```
//PA33BHOP JOB (XXX),MSGCLASS=A,MSGLEVEL=(2,0),NOTIFY=PA33B,
//          ATTR=(T0,C2,W2)
/*JOBPARM LINECT=88
//*----- PA33B.HOPE.CNTL(GOTRAN) -----
//HOPE EXEC PGM=HOPE
//STEPLIB DD DSN=PA33B.HOPE.LOAD,DISP=SHR
//FT01F001 DD UNIT=WORK,SPACE=(TRK,(1,1)),DISP=(,DELETE),
//          DCB=(LRECL=80,BLKSIZE=3200,RECFM=FB)
//FT05F001 DD DSN=PA33B.HOPE.DATA(TR1V45),DISP=SHR,LABEL=(,,IN)
//FT06F001 DD DSN=&&COMPACT,UNIT=WORK,DISP=(NEW,PASS),
//          SPACE=(TRK,(30,30)),DCB=(LRECL=137,BLKSIZE=19043,RECFM=FBA)
//COMPACT EXEC PGM=JRQCPR,PARM='TYPE2,CC=YES'
//UTYIN DD DSN=&&COMPACT,DISP=(OLD,DELETE)
//UTYNLP DD SYSOUT=*
//UTYLIST DD SYSOUT=*
```

←ワークファイル

←入力データ

←印刷出力

HOPEコードロードモジュール作成用JCL

```
//PA33BCLG JOB (XXX),MSGCLASS=X,MSGLEVEL=(1,0),NOTIFY=PA33B,
//          ATTR=(T0,C1,W0)
/*-----
//FORT EXEC PGM=JZK@FORT,PARM=('NOS,OPT(3),ISN(D),ELM(*)')
//SYSPRINT DD SYSOUT=*
//SYSIN DD DSN=PA33B.HOPE.FORT,DISP=SHR
//SYSINC DD DSN=PA33B.HOPE.INC,DISP=SHR
//SYSLIN DD DSN=&&OBJ,UNIT=WORK,DISP=(NEW,PASS),
//          SPACE=(TRK,(10,5),RLSE),DCB=BLKSIZE=3200
/*-----
//LINK EXEC PGM=JQAL,PARM=('SIZE(512K,36K),LIST,LET')
//SYSPRINT DD SYSOUT=*
//SYSLIN DD DSN=&&OBJ,DISP=(OLD,DELETE)
// DD *
ENTRY MAIN
NAME HOPE(R)
/*
//SYSLMOD DD DSN=PA33B.HOPE.LOAD,DISP=(NEW,CATLG),
//          SPACE=(TRK,(10,5,1),RLSE),UNIT=DASD
/*YSLMOD DD DSN=PA33B.HOPE.LOAD,DISP=SHR
//SYSLIB DD DSN=SYS1.FORTLIB,DISP=SHR
//
```

←フォートランソース

←インクルードファイル

←ロードモジュール

F 出力リスト

①入力データエコー

```

*** INPUT DATA LIST ***
*.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*.....6.....*.....7.....*.....8
* DETERMINISTIC CALC. DATA FOR AST STEEL CORE
* CASE 3 ( PLENUM VOLUME = 45 CC )
* 1990.3.27
*
* 6
* 0.0 456.0000 456.0001 912.0000 912.0001 1368.0000
* 390.0 430.0 375.0 415.0 365.0 405.0
* 656.0 700.0 646.0 690.0 637.0 681.0
* 1 9 1
* 20.0 5.0 15.0 15.0 10.0 10.0 10.0
* 15.0 15.0 5.0 20.0
* TIME 1
* 0.131 0.538 0.710 0.892 0.977 1.000 0.977
* 0.892 0.710 0.538 0.131
* TIME 2
* 0.131 0.538 0.710 0.892 0.977 1.000 0.977
* 0.892 0.710 0.538 0.131
* TIME 3
* 0.131 0.538 0.710 0.892 0.977 1.000 0.977
* 0.892 0.710 0.538 0.131
* TIME 4
* 0.131 0.538 0.710 0.892 0.977 1.000 0.977
* 0.892 0.710 0.538 0.131
* TIME 5
* 0.131 0.538 0.710 0.892 0.977 1.000 0.977
* 0.892 0.710 0.538 0.131
* TIME 6
* 0.131 0.538 0.710 0.892 0.977 1.000 0.977
* 0.892 0.710 0.538 0.131
* 92.0 93.333 0.154 0.158 1.98 8.30 8.30
* 2.0 5.0
* 1.03 1.50 180.0 50.0 45.0 375.0
* 0.45 0.42
* 7.22 7.2533
* 100.0 100.5
&OPTDAT
DTNML(3)=500.000,
&END
* 1
* 1368.0000 1
* 8
* 0.0 0.5 1.0 1.4 1.8 2.4 5.0
* 10.0
* 700.0 710.0 740.0 745.0 750.0 750.0 730.0
* 700.0
*.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*.....6.....*.....7.....*.....8
*** DATA-LIST END ***

```

```

*****
* < HOPE > HOOP STRESS AND CDF DETERMINISTIC EVALUATE CODE 3/1990 *
*
* VERSION 1 FIXED 3/1990 *
*
*****

```

◎ 入力情報(通常運転時計算用)

+ NORMAL OPERATION CALC. DATA (FORMATTED) +

< 1 > HISTORICAL DATA (INPUT TIME POINT NO = 6) ←履歴時刻点数

TIME POINT NO. TIME (DAY)	1	2	3	4	5	6	
1) PEAK LINEAR HEAT RATE (NOMINAL) (W/CM)	390.00	430.00	375.00	415.00	365.00	405.00	←履歴時刻
2) CLAD MIDWALL TEMP. (HOT SPOT) (DEG-C)	656.00	700.00	646.00	690.00	637.00	681.00	←公称ピーク線出力履歴 ←被覆管肉厚中心ホットスポット温度履歴

3) AXIAL POWER DISTRIBUTION (NORMALIZED)

NODE NO.	LENGTH (CM)	HEIGHT (CM)	1	2	3	4	5	6	
1	20.00	20.00	0.131	0.131	0.131	0.131	0.131	0.131	←軸方向各ノードの長さおよび相対出力値
2	5.00	25.00	0.538	0.538	0.538	0.538	0.538	0.538	
3	15.00	40.00	0.710	0.710	0.710	0.710	0.710	0.710	
4	15.00	55.00	0.892	0.892	0.892	0.892	0.892	0.892	
5	10.00	65.00	0.977	0.977	0.977	0.977	0.977	0.977	
6	10.00	75.00	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	
7	10.00	85.00	0.977	0.977	0.977	0.977	0.977	0.977	
8	15.00	100.00	0.892	0.892	0.892	0.892	0.892	0.892	
9	15.00	115.00	0.710	0.710	0.710	0.710	0.710	0.710	
CORE TOP ==> 10	5.00	120.00	0.538	0.538	0.538	0.538	0.538	0.538	←炉心燃料部上端ノード
11	20.00	140.00	0.131	0.131	0.131	0.131	0.131	0.131	

< 2 > AXIAL MESH DATA

	NODE NO.	LENGTH (CM)	
LOWER BLANKET	1 - 1	20.00	←下部ブランケットの軸方向分割数
CORE FUEL	2 - 10	100.00	←炉心燃料スタック部の軸方向分割数
UPPER BLANKET	11 - 11	20.00	←上部ブランケットの軸方向分割数

< 3 > COMMON CALC. CONDITION DATA ←基準計算、感度解析に共通のデータ

1) FUEL PELLETT DENSITY	(%-TD)	92.000	←炉心燃料ペレット対理論密度
2) PUO2 ENRICHMENT	(%)	0.164	←炉心燃料ペレットPuO ₂ 富化度
3) CLAD OUTER DIAMETER	(MM)	8.300	←被覆管外径
4) THERMAL POWER ERROR	(%)	2.000	←熱出力誤差
5) NUCLEAR CALC. ERROR	(%)	5.000	←核計算誤差

6) INITIAL HE GAS PRESSURE	(KGF/CM2)	1.030	← 製作時Heガス封入圧力
7) CLAD OUTER PRESSURE	(KGF/CM2)	1.500	← 運転時被覆管外圧
8) IMPURE GAS IN CORE FUEL	(L/G*1E-6)	180.000	← 炉心燃料ペレットに含まれる蒸発性不純物量
9) IMPURE GAS IN BLANKET	(L/G*1E-6)	50.000	← ブランケットに含まれる蒸発性不純物量
10) PLENUM VOLUME	(CC)	45.000	← 下部ガスプレナム有効容積
11) PLENUM GAS TEMP.	(DEG-C)	375.000	← 冷却材入口温度(プレナムガス温度)
12) FP GAS RELEASE RATE FROM BLANKET	(-)	0.10 (FIXED)	← ブランケットからのFPガス放出率
13) CLAD HEAT CONDUCTIVITY EQUATION		NOMINAL	← 被覆管熱伝導度式
14) CREEP STRENGTH EQUATION		LOWER LIMIT	← クリープ強度式

< 4 > SENSITIVITY ANALYSIS CONDITION DATA ← 基準計算、各感度解析によって異なるデータ

	BASE CALC.	SENS. 1	SENS. 2	SENS. 3	SENS. 4	SENS. 5	SENS. 6
1) CLAD THICKNESS (MM)	0.450	< 0.420 >	0.450	0.450	0.450	0.450	0.450
2) FUEL PELLETT DIAMETER (MM)	7.220	7.220	< 7.253 >	7.220	7.220	7.220	7.220
3) CORE FUEL STACK LENGTH (CM)	100.000	100.000	100.000	< 100.500 >	100.000	100.000	100.000
4) CLAD INNER CORROSION (FCCI) EQUATION	NOMINAL	NOMINAL	NOMINAL	NOMINAL	< UPPER L. >	NOMINAL	NOMINAL
5) CLAD OUTER CORROSION (NA COR.) EQ.	NOMINAL	NOMINAL	NOMINAL	NOMINAL	NOMINAL	< UPPER L. >	NOMINAL
6) FP GAS RELEASE RATE (FROM FUEL) EQ.	NOMINAL	NOMINAL	NOMINAL	NOMINAL	NOMINAL	NOMINAL	< UPPER L. >

< 5 > ANOTHER DATA (THESE DATA ARE USED TO MODIFY LINEAR HEAT RATE OR CLAD TEMP. , ETC.)

1) FUEL PELLETT DENSITY MAXIMUM VALUE	(%-TD)	93.333	← 炉心燃料ペレット対理論密度上限値
2) PUO2 ENRICHMENT MAXIMUM VALUE	(-)	0.158	← 炉心燃料ペレットPuO ₂ 富化度上限値
3) CLAD OUTER DIAMETER NOMINAL VALUE	(MM)	8.300	← 被覆管外径ノミナル値
4) O/M RATIO NOMINAL VALUE	(-)	1.980	← 炉心燃料ペレットO/M比ノミナル値

+ NORMAL OPERATION CALC. DATA (NAMELIST) +

< 1 > TIME DIVISION & OUTPUT TIME DATA ← 計算時刻、計算結果出力時刻データ

1) TIME DIVIDE POINT =	EVERY	1.000 DAY	+ ALL INPUT TIME POINTS	← 1日刻みの時刻点および各入力履歴時刻点毎に計算する。
2) SHORT OUTPUT TIME =	OVER EVERY	10.000 DAY	+ ALL INPUT TIME POINTS	← 計算時刻が10日刻みの時刻を越える毎に周方向応力とCDFの上限値を出力する。
3) MAJOR OUTPUT TIME =	OVER EVERY	500.000 DAY	+ ALL INPUT TIME POINTS	← 計算時刻が10日刻みの時刻を越える毎に基準計算、各感度解析結果を出力する。

< 2 > CHARACTERISTIC CONSTANT DATA , ETC.

1) FISSION GAS YIELD RATIO (ATOMS/FISSION)	0.27000	← 核分裂当たりのガス原子生成数
2) FISSION ENERGY (MEV/FISSION)	200.00000	← 核分裂当たりの生成エネルギー
3) EFFICIENT FROM SR BASE STRESS TO ST BASE STRESS (-)	0.80000	← S _R ベース応力からS _t ベース応力への換算係数
4) CONSTANT FOR MODIFYING CREEP STRENGTH BY IN-PILE ENVIRONMENT EFFECT (-)	0.70000	← 炉内環境効果によるクリープ強度劣化係数

< 3 > CHARACTERISTIC EQUATION DATA ← 通常運転時計算に使用する諸物性式の係数データ

1) CLAD INNER CORROSION (FCCI)	EQ. NO. = 1 , NO. OF COEFFICIENT = 6	← 被覆管内面腐食式番号と係数の数
--------------------------------	--------------------------------------	-------------------

	(1) 1.50000D+04	(2) 6.00000D+04	(3) 6.50000D+01	(4) -3.50000D+01	(5) 0.00000D+00	(6) 3.50000D+01	←物性式の係数(以下同様)
2) CLAD OUTER CORROSION (NA CORROSION)	EQ. NO. = 1 , NO. OF COEFFICIENT = 7						←被覆管外面腐食式番号と係数の数
	(1) -1.64700D+04	(2) 6.97720D+00	(3) 6.97720D+00	(4) 3.00000D+00	(5) 2.28000D+08	(6) 4.11800D+08	(7) 5.95600D+08
3) FP GAS RELEASE RATE (FROM FUEL)	EQ. NO. = 1 , NO. OF COEFFICIENT = 6						←FPガス放出率式番号と係数の数
	(1) 2.00000D+01	(2) 9.00000D+01	(3) 6.00000D+00	(4) 8.00000D+01	(5) 9.00000D+01	(6) 1.00000D+02	
4) CREEP STRENGTH (RUPTURE TIME) (NORMAL OPERATION CALC.)	EQ. NO. = 1 , NO. OF COEFFICIENT = 11						←クリープ強度式番号と係数の数
	(1) 2.73000D+02	(2) -2.22600D+01	(3) 1.50000D+01	(4) -1.13750D+01	(5) 2.38810D+01	(6) 1.36680D+01	(7) -2.87500D+00
	(9) -4.77120D-01	(10) 0.00000D+00	(11) 4.77120D-01				(8) 2.94018D+01
5) CLAD HEAT CONDUCTIVITY	EQ. NO. = 1 , NO. OF COEFFICIENT = 4						←被覆管熱伝導度式番号と係数の数
	(1) 1.32000D-01	(2) 1.30000D-04	(3) 1.30000D-04	(4) 1.30000D-04			
6) DESIGN TENSILE STRENGTH (SU)	EQ. NO. = 1 , NO. OF COEFFICIENT = 9						←被覆管設計引張り強さ式番号と係数の数
	(1) 1.45140D-15	(2) -2.08420D-12	(3) 1.82960D-11	(4) 9.35270D-07	(5) -3.51520D-04	(6) 1.75290D-03	(7) 6.91029D+01
	(9) 6.91029D+01						(8) 6.91029D+01
7) DESIGN YIELD STRENGTH (SY)	EQ. NO. = 1 , NO. OF COEFFICIENT = 9						←被覆管設計降伏点式番号と係数の数
	(1) 4.77190D-16	(2) -7.48880D-14	(3) -1.35100D-09	(4) 1.28490D-06	(5) -3.96020D-04	(6) 1.55240D-02	(7) 5.84418D+01
	(9) 5.84418D+01						(8) 5.84418D+01

⑨ 入力情報(過渡変化時計算用)

 + TRANSIENT CALC. DATA (FORMATTED) +

< 1 > TRANSIENT CALC. HISTORY DATA ← 過渡変化履歴データ

* NUMBER OF TRANSIENT CALC. TIME POINT 1 ← 過渡変化を想定する時刻点数

* TRANSIENT CALC. TIME
 NO. 1
 TIME (DAY) 1368.000 ← 過渡変化を想定する時刻
 NO. OF HISTORY 1 ← 履歴パターン数

** NO. 1 ** 1368.000 DAY , NO. OF HISTORY = 1

HISTORY NO. < 1 >	← 過渡履歴パターン								
NO.	1	2	3	4	5	6	7	8	
TIME (SEC)	0.000	0.500	1.000	1.400	1.800	2.400	5.000	10.000	← 時刻(秒)
TEMP. (DEG-C)	700.000	710.000	740.000	745.000	750.000	750.000	730.000	700.000	← 被覆管肉厚中心温度

 + TRANSIENT CALC. DATA (NAMELIST) +

< 1 > TIME DIVISION & OUTPUT TIME DATA

- 1) TIME DIVIDE POINT = EVERY 0.050 SEC + ALL INPUT TIME POINTS ← 0.05秒刻みの時刻点および各入力履歴時刻点毎に計算する。
- 2) RESULT OUTPUT TIME = OVER EVERY 0.500 SEC + ALL INPUT TIME POINTS ← 計算時刻が0.5秒刻みの時刻を越える毎に過渡計算結果を出力する。

< 2 > CHARACTERISTIC EQUATION DATA ← 過渡変化時計算に使用する諸物性式の係数データ

- 1) CLAD YOUNG MODULUS

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	
6.50000D+02	8.50000D+02	3.76560D-06	-9.35380D-03	-3.27610D+00	1.97310D+04	2.12600D+04	-1.01250D+01	← ヤング率相対値式番号および係数の数
(9)	(10)	(11)	(12)	← 係数の値(以下同様)				
-1.10156D+01	2.18640D+04	2.18640D+04	2.18640D+04					
- 2) CREEP STRENGTH (RUPTURE TIME) (TRANSIENT CALC.)

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	
2.73150D+02	-2.22000D+01	-7.66140D+00	1.75760D+01	-1.63390D+01	3.17370D+01	-2.14200D+00	0.00000D+00	← クリープ強度式番号および係数の数
(9)								
2.14200D+00								

◎ 計算結果(通常運転時計算)

 * NORMAL OPERATION CALCULATION RESULTS OUTPUT *

 * OUTPUT TIME 1 * 0.00 DAY (0.00 HOUR) <== INPUT TIME POINT 1 ←計算結果出力時刻

< PEAK POWER (NOMINAL) > 390.00 W/CM < CLAD MID. TEMP. (HOT SPOT) > 656.00 DEG-C ←ピーク線出力、被覆管肉厚中心温度

< BURNUP > (1) AVERAGE --- 0.000D+00 (MWD/MTM) ←平均燃焼度
 (2) LOCAL --- 0.000D+00 (MWD/MTM) ←炉心上端部の局所燃焼度

< HOOP STRESS LIMIT VALUE > HOT SPOT TEMP. BASE NOMINAL TEMP. BASE ←被覆管周方向応力制限値(ホットスポット温度およびノミナル温度ベース)
 SM* SY* SM* SY*
 16.869 27.279 18.346 28.808 ←SM*---設計応力強さ、SY*---設計降伏点

< AXIAL POWER DISTRIBUTION >
 { NODE NO } 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
 { VALUE } 0.131 0.538 0.710 0.892 0.977 1.000 0.977 0.892 0.710 0.538 ←軸方向出力分布相対値(入力履歴時刻点以外の時刻では内挿値)
 { NODE NO } 11
 { VALUE } 0.131

< MAIN RESULTS > 基準計算および各感度解析結果

	BASE CALC.	SENS. 1	SENS. 2	SENS. 3	SENS. 4	SENS. 5	SENS. 6
1) PEAK LINEAR HEAT RATE (MODIFIED) (W/CM)	434.75	434.75	438.77	434.75	434.75	434.75	434.75
2) CLAD MIDWALL TEMP. AT CORE TOP (MOD.) (DEG-C)	654.6	654.6	654.6	656.0	654.6	654.6	654.6
3) CLAD OUTER TEMP. AT CORE TOP (CALC.) (DEG-C)	646.0	646.0	646.0	647.4	646.0	646.0	646.0
4) CLAD INNER CORROSION DEPTH (FCCI) (MICRO-M)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5) CLAD OUTER CORROSION DEPTH (BY NA) (MICRO-M)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6) CLAD THICKNESS (MM)	0.450	0.420	0.450	0.450	0.450	0.450	0.450
7) CLAD INNER DIAMETER (MM)	7.400	7.460	7.400	7.400	7.400	7.400	7.400
8) CLAD OUTER DIAMETER (MM)	8.300	8.300	8.300	8.300	8.300	8.300	8.300
9) FP GAS RELEASE RATE FROM CORE FUEL (-)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10) CLAD INNER PRESSURE (KGF/CM2)	5.12	5.12	5.12	5.12	5.12	5.12	5.12
11) HOOP STRESS (KGF/MM2)	0.447	0.481	0.447	0.447	0.447	0.447	0.447
12) TIME TO RUPTURE (SR-BASE) (HOUR)	1.819D+09	1.819D+09	1.819D+09	1.628D+09	1.819D+09	1.819D+09	1.819D+09
13) TIME TO RUPTURE (ST-BASE) (HOUR)	9.109D+08	9.109D+08	9.109D+08	8.161D+08	9.109D+08	9.109D+08	9.109D+08
14) CDF (SR-BASE) (-)	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00
15) CDF (ST-BASE) (-)	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00

以下は被覆管周方向応力上限値、それを用いて得られた被覆管破断時間、およびCDF上限値

TIME (DAY)	TEMP (DEG-C)	HOOP STRESS (KGF/MM2)								<= RUPTURE TIME (HOUR) =>		<===== CDF (-) =====>	
		BASE	1	2	3	4	5	6	MODIFIED	SR-BASE	ST-BASE	SR-BASE	ST-BASE
0.0	656.0	0.447	0.481	0.447	0.447	0.447	0.447	0.447	0.481	1.6280D+09	8.1611D+08	0.0000D+00	0.0000D+00
10.0	657.0	0.449	0.483	0.449	0.449	0.489	0.449	0.454	0.502	1.5084D+09	7.5668D+08	1.5319D-07	3.0549D-07
20.0	657.9	0.453	0.488	0.453	0.453	0.494	0.454	0.463	0.507	1.3978D+09	7.0168D+08	3.1852D-07	6.3494D-07
30.0	658.9	0.460	0.495	0.460	0.460	0.501	0.461	0.474	0.516	1.2954D+09	6.5079D+08	4.9693D-07	9.9019D-07
40.0	659.9	0.469	0.505	0.469	0.469	0.511	0.470	0.488	0.527	1.2008D+09	6.0368D+08	6.8940D-07	1.3732D-06
50.0	660.8	0.480	0.517	0.480	0.480	0.523	0.482	0.504	0.541	1.1133D+09	5.6006D+08	8.9703D-07	1.7860D-06

60.0	661.8	0.494	0.531	0.494	0.494	0.538	0.495	0.522	0.558	1.0323D+09	5.1968D+08	1.1210D-06	2.2310D-06
70.0	662.8	0.509	0.548	0.510	0.509	0.556	0.511	0.542	0.578	8.7053D+08	4.3867D+08	1.3732D-06	2.7318D-06
80.0	663.7	0.526	0.567	0.527	0.527	0.574	0.529	0.564	0.599	7.2085D+08	3.6342D+08	1.6764D-06	3.3350D-06
90.0	664.7	0.546	0.588	0.547	0.547	0.595	0.549	0.589	0.623	5.9274D+08	2.9904D+08	2.0440D-06	4.0623D-06
100.0	665.6	0.567	0.611	0.568	0.568	0.619	0.571	0.615	0.650	4.8468D+08	2.4470D+08	2.4924D-06	4.9507D-06
110.0	666.6	0.591	0.636	0.592	0.591	0.644	0.594	0.643	0.678	3.9463D+08	1.9937D+08	3.0419D-06	6.0389D-06
120.0	667.6	0.618	0.663	0.617	0.617	0.672	0.620	0.673	0.709	3.2030D+08	1.6193D+08	3.7181D-06	7.3768D-06
130.0	668.5	0.643	0.692	0.644	0.644	0.701	0.648	0.705	0.741	2.5940D+08	1.3124D+08	4.5522D-06	9.0259D-06
140.0	669.5	0.671	0.723	0.673	0.673	0.732	0.677	0.738	0.776	2.0980D+08	1.0622D+08	5.5828D-06	1.1062D-05
150.0	670.5	0.701	0.756	0.704	0.703	0.765	0.708	0.774	0.812	1.6958D+08	8.5913D+07	6.8577D-06	1.3580D-05
160.0	671.4	0.733	0.790	0.736	0.735	0.800	0.741	0.811	0.850	1.3707D+08	6.9491D+07	8.4349D-06	1.6692D-05
170.0	672.4	0.767	0.826	0.770	0.769	0.837	0.775	0.849	0.890	1.1085D+08	5.6236D+07	1.0386D-05	2.0638D-05
180.0	673.4	0.802	0.864	0.805	0.804	0.875	0.811	0.889	0.932	8.9725D+07	4.5562D+07	1.2797D-05	2.5290D-05
190.0	674.3	0.838	0.903	0.842	0.841	0.915	0.849	0.931	0.976	7.2722D+07	3.6945D+07	1.5774D-05	3.1152D-05
200.0	675.3	0.876	0.944	0.880	0.879	0.957	0.888	0.974	1.021	5.9034D+07	3.0012D+07	1.9444D-05	3.8373D-05
210.0	676.3	0.916	0.987	0.920	0.919	1.000	0.928	1.019	1.067	4.8009D+07	2.4424D+07	2.3962D-05	4.7255D-05
220.0	677.2	0.956	1.031	0.961	0.960	1.045	0.971	1.065	1.116	3.9120D+07	1.9916D+07	2.9510D-05	5.8158D-05
230.0	678.2	0.998	1.077	1.003	1.002	1.091	1.014	1.112	1.165	3.1946D+07	1.6274D+07	3.6312D-05	7.1515D-05
240.0	679.2	1.044	1.126	1.049	1.048	1.141	1.061	1.163	1.219	2.5980D+07	1.3244D+07	4.4656D-05	8.7887D-05
250.0	680.1	1.091	1.177	1.097	1.096	1.193	1.110	1.216	1.275	2.1150D+07	1.0789D+07	5.4915D-05	1.0800D-04
260.0	681.1	1.140	1.231	1.146	1.145	1.247	1.161	1.270	1.333	1.7258D+07	8.8098D+06	6.7501D-05	1.3267D-04
270.0	682.1	1.190	1.285	1.197	1.195	1.302	1.214	1.326	1.392	1.4115D+07	7.2105D+06	8.2908D-05	1.6284D-04
280.0	683.0	1.242	1.342	1.249	1.247	1.360	1.268	1.384	1.453	1.1573D+07	5.9156D+06	1.0172D-04	1.9965D-04
290.0	684.0	1.295	1.399	1.303	1.301	1.418	1.323	1.443	1.516	9.5104D+06	4.8647D+06	1.2464D-04	2.4447D-04
300.0	684.9	1.350	1.459	1.358	1.356	1.479	1.381	1.503	1.580	7.8342D+06	4.0100D+06	1.5249D-04	2.9891D-04
310.0	685.9	1.406	1.520	1.414	1.412	1.541	1.439	1.565	1.646	6.4685D+06	3.3132D+06	1.8627D-04	3.6487D-04
320.0	686.9	1.463	1.582	1.472	1.470	1.604	1.500	1.629	1.714	5.3533D+06	2.7438D+06	2.2712D-04	4.4460D-04
330.0	687.8	1.522	1.647	1.531	1.529	1.669	1.562	1.694	1.784	4.4404D+06	2.2775D+06	2.7643D-04	5.4077D-04
340.0	688.8	1.582	1.712	1.592	1.590	1.736	1.625	1.780	1.855	3.6915D+06	1.8946D+06	3.3581D-04	6.5650D-04
350.0	689.8	1.643	1.779	1.654	1.652	1.804	1.691	1.828	1.928	3.0756D+06	1.5796D+06	4.0715D-04	7.9545D-04
360.0	690.7	1.706	1.848	1.717	1.715	1.874	1.757	1.897	2.002	2.5679D+06	1.3197D+06	4.9268D-04	9.6193D-04
370.0	691.7	1.770	1.918	1.782	1.780	1.945	1.826	1.967	2.078	2.1486D+06	1.1049D+06	5.9501D-04	1.1610D-03
380.0	692.7	1.835	1.990	1.848	1.846	2.018	1.896	2.039	2.156	1.8014D+06	9.2700D+05	7.1718D-04	1.3985D-03
390.0	693.6	1.902	2.063	1.915	1.913	2.092	1.967	2.113	2.235	1.5133D+06	7.7925D+05	8.6276D-04	1.6813D-03
400.0	694.6	1.970	2.138	1.984	1.982	2.168	2.041	2.188	2.316	1.2737D+06	6.5632D+05	1.0369D-03	2.0173D-03
410.0	695.6	2.040	2.214	2.054	2.052	2.246	2.118	2.264	2.399	1.0740D+06	5.5381D+05	1.2414D-03	2.4160D-03
420.0	696.5	2.110	2.292	2.125	2.123	2.326	2.192	2.342	2.484	9.0733D+05	4.6816D+05	1.4848D-03	2.8879D-03
430.0	697.5	2.182	2.371	2.198	2.196	2.406	2.271	2.421	2.570	7.6785D+05	3.9645D+05	1.7727D-03	3.4457D-03
440.0	698.5	2.256	2.452	2.272	2.270	2.488	2.351	2.501	2.658	6.5090D+05	3.3629D+05	2.1126D-03	4.1039D-03
450.0	699.4	2.330	2.534	2.347	2.346	2.572	2.433	2.583	2.748	5.5268D+05	2.8573D+05	2.5133D-03	4.8791D-03

 * OUTPUT TIME 2 * 456.00 DAY (10944.00 HOUR) <== INPUT TIME POINT 2

< PEAK POWER (NOMINAL) > 430.00 W/CM < CLAD MID. TEMP. (HOT SPOT) > 700.00 DEG-C
 < BURNUP > (1) AVERAGE --- 4.667D+04 (MWD/MTM)
 (2) LOCAL --- 3.026D+04 (MWD/MTM)
 < HOOP STRESS LIMIT VALUE > HOT SPOT TEMP. BASE NOMINAL TEMP. BASE
 SM* SY* SM* SY*
 13.778 23.556 15.313 25.562

< AXIAL POWER DISTRIBUTION >

{ NODE NO }	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
{ VALUE }	0.131	0.538	0.710	0.892	0.977	1.000	0.977	0.892	0.710	0.538
{ NODE NO }	11									
{ VALUE }	0.131									

< MAIN RESULTS >

		BASE CALC.	SENS. 1	SENS. 2	SENS. 3	SENS. 4	SENS. 5	SENS. 6
1) PEAK LINEAR HEAT RATE (MODIFIED)	(W/CM)	479.34	479.34	483.77	479.34	479.34	479.34	479.34
2) CLAD MIDWALL TEMP. AT CORE TOP (MOD.)	(DEG-C)	698.4	698.4	698.4	700.0	698.4	698.4	698.4
3) CLAD OUTER TEMP. AT CORE TOP (CALC.)	(DEG-C)	689.2	689.2	689.2	690.8	689.2	689.2	689.2
4) CLAD INNER CORROSION DEPTH (FCCI)	(MICRO-M)	22.04	22.04	22.04	22.04	57.04	22.04	22.04
5) CLAD OUTER CORROSION DEPTH (BY NA)	(MICRO-M)	39.29	39.29	39.29	40.41	39.29	56.82	39.29
6) CLAD THICKNESS	(MM)	0.389	0.389	0.389	0.388	0.354	0.371	0.389
7) CLAD INNER DIAMETER	(MM)	7.444	7.504	7.444	7.444	7.514	7.444	7.444
8) CLAD OUTER DIAMETER	(MM)	8.221	8.221	8.221	8.219	8.221	8.186	8.221
9) FP GAS RELEASE RATE FROM CORE FUEL	(-)	0.717	0.717	0.717	0.717	0.717	0.717	0.817
10) CLAD INNER PRESSURE	(KGF/CM2)	23.58	23.58	23.75	23.67	23.58	23.58	26.13
11) HOOP STRESS	(KGF/MM2)	2.376	2.584	2.393	2.392	2.623	2.483	2.633
12) TIME TO RUPTURE (SR-BASE)	(HOUR)	9.121D+05	7.110D+05	8.930D+05	8.014D+05	6.808D+05	8.009D+05	6.728D+05
13) TIME TO RUPTURE (ST-BASE)	(HOUR)	4.712D+05	3.673D+05	4.613D+05	4.145D+05	3.517D+05	4.138D+05	3.476D+05
14) CDF (SR-BASE)	(-)	1.542D-03	1.967D-03	1.574D-03	1.752D-03	2.052D-03	1.716D-03	2.105D-03
15) CDF (ST-BASE)	(-)	2.996D-03	3.821D-03	3.057D-03	3.401D-03	3.986D-03	3.333D-03	4.089D-03

TIME (DAY)	TEMP (DEG-C)	HOOP STRESS (KGF/MM2)								RUPTURE TIME (HOUR)		CDF (-)	
		BASE	1	2	3	4	5	6	MODIFIED	SR-BASE	ST-BASE	SR-BASE	ST-BASE
456.0	700.0	(2.376	2.584	2.393	2.392	2.623	2.483	2.633	) 2.803	5.0139D+05	2.5931D+05	2.7870D-03	5.4084D-03

 * OUTPUT TIME 3 * 456.00 DAY (10944.00 HOUR) <=== INPUT TIME POINT 3

< PEAK POWER (NOMINAL) > 375.00 W/CM < CLAD MID. TEMP. (HOT SPOT) > 646.00 DEG-C

< BURNUP > (1) AVERAGE --- 4.667D+04 (MWD/MTM)
 (2) LOCAL --- 3.026D+04 (MWD/MTM)

< HOOP STRESS LIMIT VALUE > HOT SPOT TEMP. BASE NOMINAL TEMP. BASE
 SM* SY* SM* SY*
 15.708 27.183 16.972 28.637

< AXIAL POWER DISTRIBUTION >

{ NODE NO }	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
{ VALUE }	0.131	0.538	0.710	0.892	0.977	1.000	0.977	0.892	0.710	0.538
{ NODE NO }	11									
{ VALUE }	0.131									

< MAIN RESULTS >

		BASE CALC.	SENS. 1	SENS. 2	SENS. 3	SENS. 4	SENS. 5	SENS. 6
1) PEAK LINEAR HEAT RATE (MODIFIED)	(W/CM)	418.03	418.03	421.89	418.03	418.03	418.03	418.03

2) CLAD MIDWALL TEMP. AT CORE TOP (MOD.) (DEG-C)	644.7	644.7	644.7	646.0	644.7	644.7	644.7	644.7
3) CLAD OUTER TEMP. AT CORE TOP (CALC.) (DEG-C)	636.4	636.4	636.4	637.7	636.4	636.4	636.4	636.4
4) CLAD INNER CORROSION DEPTH (FCCI) (MICRO-M)	22.04	22.04	22.04	22.04	22.04	22.04	22.04	22.04
5) CLAD OUTER CORROSION DEPTH (BY NA) (MICRO-M)	39.29	39.29	39.29	40.41	39.29	56.82	39.29	39.29
6) CLAD THICKNESS (MM)	0.389	0.359	0.389	0.388	0.354	0.371	0.389	0.389
7) CLAD INNER DIAMETER (MM)	7.444	7.504	7.444	7.444	7.514	7.444	7.444	7.444
8) CLAD OUTER DIAMETER (MM)	8.221	8.221	8.221	8.219	8.221	8.186	8.221	8.221
9) FP GAS RELEASE RATE FROM CORE FUEL (-)	0.717	0.717	0.717	0.717	0.717	0.717	0.717	0.817
10) CLAD INNER PRESSURE (KGF/CM2)	23.58	23.58	23.75	23.67	23.58	23.58	23.58	26.13
11) HOOP STRESS (KGF/MM2)	2.376	2.584	2.393	2.392	2.623	2.483	2.633	2.633
12) TIME TO RUPTURE (SR-BASE) (HOUR)	4.369D+07	3.356D+07	4.272D+07	3.862D+07	3.205D+07	3.807D+07	3.166D+07	3.166D+07
13) TIME TO RUPTURE (ST-BASE) (HOUR)	2.171D+07	1.668D+07	2.123D+07	1.921D+07	1.593D+07	1.892D+07	1.573D+07	1.573D+07
14) CDF (SR-BASE) (-)	1.542D-03	1.967D-03	1.574D-03	1.752D-03	2.052D-03	1.716D-03	2.105D-03	2.105D-03
15) CDF (ST-BASE) (-)	2.996D-03	3.821D-03	3.057D-03	3.401D-03	3.986D-03	3.333D-03	4.089D-03	4.089D-03

TIME (DAY)	TEMP (DEG-C)	HOOP STRESS (KGF/MM2)										<= RUPTURE TIME (HOUR) =>		<===== CDF (-) =====>	
		BASE	1	2	3	4	5	6	MODIFIED			SR-BASE	ST-BASE	SR-BASE	ST-BASE
456.0	646.0	{ 2.376	2.584	2.393	2.392	2.623	2.483	2.633	2.803			2.3504D+07	1.1694D+07	2.7870D-03	5.4084D-03
460.0	646.4	{ 2.401	2.612	2.418	2.417	2.651	2.510	2.661	2.833			2.2080D+07	1.0989D+07	2.7912D-03	5.4169D-03
470.0	647.4	{ 2.465	2.682	2.482	2.481	2.722	2.578	2.730	2.909			1.8906D+07	9.4160D+06	2.8030D-03	5.4405D-03
480.0	648.3	{ 2.529	2.753	2.547	2.546	2.794	2.647	2.801	2.986			1.6210D+07	8.0792D+06	2.8167D-03	5.4680D-03
490.0	649.3	{ 2.594	2.825	2.613	2.612	2.867	2.717	2.872	3.064			1.3917D+07	6.9415D+06	2.8327D-03	5.5001D-03

 * OUTPUT TIME 4 * 500.00 DAY (12000.00 HOUR)

< PEAK POWER (NOMINAL) > 378.86 W/CM < CLAD MID. TEMP. (HOT SPOT) > 650.25 DEG-C

< BURNUP > (1) AVERAGE --- 5.081D+04 (MWD/MTM)
 (2) LOCAL --- 3.294D+04 (MWD/MTM)

< HOOP STRESS LIMIT VALUE > HOT SPOT TEMP. BASE NOMINAL TEMP. BASE
 SM* SY* SM* SY*
 15.577 26.931 16.860 28.426

< AXIAL POWER DISTRIBUTION >
 (NODE NO) 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
 (VALUE) 0.131 0.538 0.710 0.892 0.977 1.000 0.977 0.892 0.710 0.538
 (NODE NO) 11
 (VALUE) 0.131

< MAIN RESULTS >

	BASE CALC.	SENS. 1	SENS. 2	SENS. 3	SENS. 4	SENS. 5	SENS. 6
1) PEAK LINEAR HEAT RATE (MODIFIED) (W/CM)	422.33	422.33	426.23	422.33	422.33	422.33	422.33
2) CLAD MIDWALL TEMP. AT CORE TOP (MOD.) (DEG-C)	648.9	648.9	648.9	650.2	648.9	648.9	648.9
3) CLAD OUTER TEMP. AT CORE TOP (CALC.) (DEG-C)	640.5	640.5	640.5	641.9	640.5	640.5	640.5
4) CLAD INNER CORROSION DEPTH (FCCI) (MICRO-M)	25.91	25.91	25.91	25.91	25.91	25.91	25.91
5) CLAD OUTER CORROSION DEPTH (BY NA) (MICRO-M)	41.40	41.40	41.40	42.58	41.40	59.88	41.40
6) CLAD THICKNESS (MM)	0.383	0.353	0.383	0.382	0.348	0.364	0.383
7) CLAD INNER DIAMETER (MM)	7.452	7.512	7.452	7.452	7.522	7.452	7.452

8) CLAD OUTER DIAMETER	(MM)	8.217	8.217	8.217	8.215	8.217	8.180	8.217
9) FP GAS RELEASE RATE FROM CORE FUEL	(-)	0.745	0.745	0.745	0.745	0.745	0.745	0.845
10) CLAD INNER PRESSURE	(KGF/CM2)	25.99	25.99	26.18	26.09	25.99	25.99	28.77
11) HOOP STRESS	(KGF/MM2)	2.660	2.897	2.680	2.678	2.941	2.788	2.944
12) TIME TO RUPTURE (SR-BASE)	(HOUR)	2.229D+07	1.708D+07	2.179D+07	1.969D+07	1.630D+07	1.925D+07	1.624D+07
13) TIME TO RUPTURE (ST-BASE)	(HOUR)	1.112D+07	8.516D+06	1.086D+07	9.828D+06	8.129D+06	9.587D+06	8.097D+06
14) CDF (SR-BASE)	(-)	1.577D-03	2.012D-03	1.609D-03	1.791D-03	2.099D-03	1.755D-03	2.152D-03
15) CDF (ST-BASE)	(-)	3.066D-03	3.911D-03	3.128D-03	3.479D-03	4.081D-03	3.413D-03	4.184D-03

TIME (DAY)	TEMP (DEG-C)	HOOP STRESS (KGF/MM2)								<= RUPTURE TIME (HOUR) =>		<===== CDF (-) =====>	
		BASE	1	2	3	4	5	6	MODIFIED	SR-BASE	ST-BASE	SR-BASE	ST-BASE
500.0	650.2	2.660	2.897	2.680	2.678	2.941	2.788	2.944	3.143	1.1964D+07	5.9719D+06	2.8513D-03	5.5374D-03
510.0	651.2	2.727	2.971	2.747	2.746	3.016	2.860	3.018	3.223	1.0299D+07	5.1442D+06	2.8729D-03	5.5808D-03
520.0	652.2	2.794	3.045	2.815	2.814	3.091	2.934	3.091	3.304	8.8759D+06	4.4367D+06	2.8981D-03	5.6311D-03
530.0	653.1	2.862	3.121	2.884	2.883	3.168	3.008	3.166	3.386	7.6889D+06	3.8312D+06	2.9272D-03	5.6893D-03
540.0	654.1	2.931	3.197	2.953	2.953	3.246	3.083	3.242	3.470	6.6166D+06	3.3122D+06	2.9610D-03	5.7568D-03
550.0	655.1	3.001	3.274	3.024	3.023	3.324	3.159	3.318	3.554	5.7227D+06	2.8667D+06	3.0000D-03	5.8347D-03
560.0	656.0	3.072	3.353	3.095	3.094	3.404	3.236	3.396	3.638	4.9550D+06	2.4840D+06	3.0451D-03	5.9248D-03
570.0	657.0	3.143	3.432	3.167	3.167	3.485	3.314	3.474	3.726	4.2950D+06	2.1547D+06	3.0972D-03	6.0286D-03
580.0	658.0	3.216	3.512	3.240	3.240	3.566	3.394	3.553	3.813	3.7269D+06	1.8710D+06	3.1572D-03	6.1482D-03
590.0	658.9	3.289	3.593	3.314	3.314	3.649	3.474	3.633	3.902	3.2372D+06	1.6263D+06	3.2264D-03	6.2859D-03
600.0	659.9	3.363	3.675	3.388	3.388	3.732	3.556	3.714	3.992	2.8147D+06	1.4150D+06	3.3060D-03	6.4443D-03
610.0	660.9	3.437	3.758	3.464	3.464	3.817	3.638	3.796	4.083	2.4496D+06	1.2324D+06	3.3974D-03	6.6262D-03
620.0	661.8	3.513	3.842	3.540	3.540	3.903	3.722	3.879	4.176	2.1339D+06	1.0743D+06	3.5025D-03	6.8350D-03
630.0	662.8	3.589	3.927	3.617	3.617	3.989	3.807	3.962	4.269	1.8606D+06	9.3740D+05	3.6231D-03	7.0743D-03
640.0	663.8	3.666	4.013	3.695	3.695	4.077	3.893	4.047	4.364	1.6238D+06	8.1864D+05	3.7613D-03	7.3485D-03
650.0	664.7	3.745	4.100	3.774	3.774	4.166	3.981	4.133	4.460	1.4183D+06	7.1554D+05	3.9195D-03	7.6624D-03
660.0	665.7	3.823	4.188	3.853	3.854	4.256	4.069	4.219	4.557	1.2398D+06	6.2594D+05	4.1007D-03	8.0213D-03
670.0	666.6	3.903	4.277	3.934	3.935	4.347	4.159	4.307	4.656	1.0846D+06	5.4799D+05	4.3078D-03	8.4314D-03
680.0	667.6	3.984	4.368	4.016	4.017	4.439	4.250	4.395	4.756	9.4965D+05	4.8013D+05	4.5445D-03	8.8997D-03
690.0	668.6	4.066	4.459	4.098	4.100	4.532	4.343	4.485	4.857	8.3207D+05	4.2098D+05	4.8147D-03	9.4339D-03
700.0	669.5	4.149	4.552	4.181	4.183	4.626	4.436	4.575	4.960	7.2959D+05	3.6938D+05	5.1230D-03	1.0043D-02
710.0	670.5	4.232	4.646	4.266	4.268	4.722	4.532	4.667	5.064	6.4017D+05	3.2434D+05	5.4744D-03	1.0737D-02
720.0	671.5	4.317	4.741	4.351	4.354	4.819	4.629	4.760	5.170	5.6209D+05	2.8497D+05	5.8748D-03	1.1527D-02
730.0	672.4	4.402	4.837	4.437	4.441	4.917	4.727	4.854	5.277	4.9385D+05	2.5055D+05	6.3307D-03	1.2426D-02
740.0	673.4	4.489	4.934	4.525	4.528	5.017	4.827	4.949	5.386	4.3416D+05	2.2042D+05	6.8494D-03	1.3448D-02
750.0	674.4	4.577	5.033	4.613	4.617	5.118	4.928	5.045	5.497	3.8192D+05	1.9403D+05	7.4392D-03	1.4609D-02
760.0	675.3	4.665	5.133	4.703	4.707	5.220	5.031	5.142	5.609	3.3615D+05	1.7090D+05	8.1096D-03	1.5928D-02
770.0	676.3	4.755	5.235	4.794	4.798	5.324	5.136	5.241	5.723	2.9603D+05	1.5061D+05	8.8709D-03	1.7425D-02
780.0	677.3	4.846	5.337	4.885	4.891	5.429	5.242	5.341	5.839	2.6084D+05	1.3279D+05	9.7352D-03	1.9124D-02
790.0	678.2	4.938	5.442	4.978	4.984	5.535	5.351	5.442	5.967	2.2994D+05	1.1714D+05	1.0716D-02	2.1049D-02
800.0	679.2	5.032	5.548	5.072	5.079	5.643	5.461	5.545	6.076	2.0280D+05	1.0339D+05	1.1828D-02	2.3232D-02
810.0	680.2	5.126	5.655	5.168	5.175	5.753	5.573	5.649	6.198	1.7894D+05	9.1285D+04	1.3089D-02	2.5704D-02
820.0	681.1	5.222	5.764	5.265	5.272	5.865	5.687	5.754	6.322	1.5796D+05	8.0636D+04	1.4517D-02	2.8503D-02
830.0	682.1	5.319	5.874	5.363	5.371	5.978	5.803	5.861	6.448	1.3949D+05	7.1257D+04	1.6135D-02	3.1671D-02
840.0	683.1	5.418	5.986	5.462	5.471	6.092	5.922	5.989	6.576	1.2323D+05	6.2992D+04	1.7967D-02	3.5256D-02
850.0	684.0	5.518	6.100	5.563	5.573	6.209	6.042	6.079	6.706	1.0890D+05	5.5706D+04	2.0040D-02	3.9310D-02
860.0	685.0	5.619	6.216	5.665	5.675	6.327	6.165	6.190	6.839	9.6271D+04	4.9278D+04	2.2386D-02	4.3894D-02
870.0	686.9	5.722	6.333	5.768	5.780	6.448	6.291	6.303	6.974	8.5131D+04	4.3606D+04	2.5039D-02	4.9075D-02
880.0	688.9	5.826	6.453	5.874	5.886	6.570	6.419	6.418	7.112	7.5301D+04	3.8596D+04	2.8038D-02	5.4929D-02
890.0	687.9	5.932	6.574	5.980	5.994	6.695	6.549	6.534	7.253	6.6623D+04	3.4171D+04	3.1429D-02	6.1542D-02
900.0	688.8	6.039	6.698	6.089	6.103	6.821	6.683	6.652	7.396	5.8958D+04	3.0260D+04	3.5261D-02	6.9010D-02
910.0	689.8	6.148	6.823	6.199	6.214	6.950	6.819	6.772	7.543	5.2186D+04	2.6802D+04	3.9590D-02	7.7443D-02

 * OUTPUT TIME 5 *

912.00 DAY (21888.00 HOUR) <== INPUT TIME POINT 4

< PEAK POWER (NOMINAL) > 415.00 W/CM < CLAD MID. TEMP. (HOT SPOT) > 690.00 DEG-C

< BURNUP > (1) AVERAGE --- 9.163D+04 (MWD/MTM)
 (2) LOCAL --- 5.941D+04 (MWD/MTM)

< HOOP STRESS LIMIT VALUE > HOT SPOT TEMP. BASE NOMINAL TEMP. BASE
 SM* SY* SM* SY*
 14.176 24.295 15.659 26.194

< AXIAL POWER DISTRIBUTION >

{ NODE NO }	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
{ VALUE }	0.131	0.538	0.710	0.892	0.977	1.000	0.977	0.892	0.710	0.538
{ NODE NO }	11									
{ VALUE }	0.131									

< MAIN RESULTS >

	BASE CALC.	SENS. 1	SENS. 2	SENS. 3	SENS. 4	SENS. 5	SENS. 6
1) PEAK LINEAR HEAT RATE (MODIFIED) (W/CM)	462.62	462.62	466.89	462.62	462.62	462.62	462.62
2) CLAD MIDWALL TEMP. AT CORE TOP (MOD.) (DEG-C)	688.4	688.4	688.4	690.0	688.4	688.4	688.4
3) CLAD OUTER TEMP. AT CORE TOP (CALC.) (DEG-C)	679.5	679.5	679.5	681.1	679.5	679.5	679.5
4) CLAD INNER CORROSION DEPTH (FCCI) (MICRO-M)	64.14	64.14	64.14	64.14	99.14	64.14	64.14
5) CLAD OUTER CORROSION DEPTH (BY NA) (MICRO-M)	72.07	72.07	72.07	74.11	72.07	104.23	72.07
6) CLAD THICKNESS (MM)	0.314	0.284	0.314	0.312	0.279	0.282	0.314
7) CLAD INNER DIAMETER (MM)	7.528	7.588	7.528	7.528	7.598	7.528	7.528
8) CLAD OUTER DIAMETER (MM)	8.156	8.156	8.156	8.152	8.156	8.092	8.156
9) FP GAS RELEASE RATE FROM CORE FUEL (-)	0.877	0.877	0.877	0.877	0.877	0.877	0.977
10) CLAD INNER PRESSURE (KGF/CM2)	49.38	49.38	49.79	49.60	49.38	49.38	54.39
11) HOOP STRESS (KGF/MM2)	6.170	6.849	6.221	6.237	6.976	6.847	6.797
12) TIME TO RUPTURE (SR-BASE) (HOUR)	1.041D+05	7.624D+04	1.016D+05	9.090D+04	7.216D+04	7.630D+04	7.800D+04
13) TIME TO RUPTURE (ST-BASE) (HOUR)	5.344D+04	3.912D+04	5.214D+04	4.669D+04	3.702D+04	3.915D+04	4.002D+04
14) CDF (SR-BASE) (-)	2.052D-02	2.759D-02	2.102D-02	2.343D-02	2.907D-02	2.654D-02	2.753D-02
15) CDF (ST-BASE) (-)	4.018D-02	5.403D-02	4.115D-02	4.583D-02	5.692D-02	5.196D-02	5.390D-02

TIME (DAY)	TEMP (DEG-C)	HOOP STRESS (KGF/MM2)								RUPTURE TIME (HOUR)		CDF (-)	
		BASE	1	2	3	4	5	6	MODIFIED	SR-BASE	ST-BASE	SR-BASE	ST-BASE
912.0	690.0	(6.170	6.849	6.221	6.237	6.976	6.847	6.797)	7.572	5.0929D+04	2.6160D+04	4.0521D-02	7.9255D-02

 * OUTPUT TIME 6 *

912.00 DAY (21888.00 HOUR) <== INPUT TIME POINT 5

< PEAK POWER (NOMINAL) > 365.00 W/CM < CLAD MID. TEMP. (HOT SPOT) > 637.00 DEG-C

< BURNUP > (1) AVERAGE --- 9.163D+04 (MWD/MTM)

(2) LOCAL --- 5.941D+04 (MWD/MTM)

< HOOP STRESS LIMIT VALUE > HOT SPOT TEMP. BASE NOMINAL TEMP. BASE
 SM* SY* SM* SY*
 15.975 27.697 17.197 29.069

< AXIAL POWER DISTRIBUTION >
 { NODE NO } 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
 { VALUE } 0.131 0.538 0.710 0.892 0.977 1.000 0.977 0.892 0.710 0.538
 { NODE NO } 11
 { VALUE } 0.131

< MAIN RESULTS >

	BASE CALC.	SENS. 1	SENS. 2	SENS. 3	SENS. 4	SENS. 5	SENS. 6
1) PEAK LINEAR HEAT RATE (MODIFIED) (W/CM)	406.88	406.88	410.64	406.88	406.88	406.88	406.88
2) CLAD MIDWALL TEMP. AT CORE TOP (MOD.) (DEG-C)	635.7	635.7	635.7	637.0	635.7	635.7	635.7
3) CLAD OUTER TEMP. AT CORE TOP (CALC.) (DEG-C)	627.6	627.6	627.6	628.9	627.6	627.6	627.6
4) CLAD INNER CORROSION DEPTH (FCCI) (MICRO-M)	64.14	64.14	64.14	64.14	99.14	64.14	64.14
5) CLAD OUTER CORROSION DEPTH (BY NA) (MICRO-M)	72.07	72.07	72.07	74.11	72.07	104.23	72.07
6) CLAD THICKNESS (MM)	0.314	0.284	0.314	0.312	0.279	0.282	0.314
7) CLAD INNER DIAMETER (MM)	7.528	7.588	7.528	7.528	7.598	7.528	7.528
8) CLAD OUTER DIAMETER (MM)	8.156	8.156	8.156	8.152	8.156	8.092	8.156
9) FP GAS RELEASE RATE FROM CORE FUEL (-)	0.877	0.877	0.877	0.877	0.877	0.877	0.977
10) CLAD INNER PRESSURE (KGF/CM2)	49.38	49.38	49.79	49.60	49.38	49.38	54.39
11) HOOP STRESS (KGF/MM2)	6.170	6.849	6.221	6.237	6.976	6.847	6.797
12) TIME TO RUPTURE (SR-BASE) (HOUR)	4.250D+06	3.055D+06	4.141D+06	3.729D+06	2.883D+06	3.058D+06	3.130D+06
13) TIME TO RUPTURE (ST-BASE) (HOUR)	2.098D+06	1.508D+06	2.044D+06	1.843D+06	1.423D+06	1.509D+06	1.545D+06
14) CDF (SR-BASE) (-)	2.052D-02	2.759D-02	2.102D-02	2.343D-02	2.907D-02	2.654D-02	2.753D-02
15) CDF (ST-BASE) (-)	4.018D-02	5.403D-02	4.115D-02	4.583D-02	5.692D-02	5.196D-02	5.390D-02

TIME (DAY)	TEMP (DEG-C)	HOOP STRESS (KGF/MM2)							<= RUPTURE TIME (HOUR) =>		<===== CDF (-) =====>		
		BASE	1	2	3	4	5	6	MODIFIED	SR-BASE	ST-BASE	SR-BASE	ST-BASE
912.0	637.0	6.170	6.849	6.221	6.237	6.976	8.847	6.797	7.572	2.0200D+06	9.9812D+05	4.0522D-02	7.9255D-02
920.0	637.8	6.240	6.928	6.291	6.308	7.068	6.930	6.873	7.664	1.8379D+06	9.0867D+05	4.0621D-02	7.9457D-02
930.0	638.7	6.314	7.012	6.366	6.382	7.143	7.018	6.955	7.759	1.6473D+06	8.1505D+05	4.0759D-02	7.9736D-02
940.0	639.7	6.384	7.091	6.437	6.454	7.223	7.101	7.032	7.849	1.4802D+06	7.3292D+05	4.0913D-02	8.0047D-02
950.0	640.7	6.456	7.170	6.508	6.526	7.305	7.186	7.110	7.940	1.3306D+06	6.5934D+05	4.1084D-02	8.0393D-02
960.0	641.6	6.526	7.250	6.580	6.598	7.386	7.271	7.188	8.031	1.1966D+06	5.9339D+05	4.1274D-02	8.0776D-02
970.0	642.6	6.597	7.331	6.652	6.670	7.468	7.356	7.267	8.124	1.0765D+06	5.3423D+05	4.1486D-02	8.1203D-02
980.0	643.6	6.669	7.412	6.724	6.743	7.551	7.443	7.346	8.216	9.6887D+05	4.8116D+05	4.1721D-02	8.1677D-02
990.0	644.5	6.741	7.493	6.797	6.817	7.634	7.530	7.425	8.310	8.7230D+05	4.3351D+05	4.1982D-02	8.2202D-02

 * OUTPUT TIME 7 * 1000.00 DAY (24000.00 HOUR)

< PEAK POWER (NOMINAL) > 372.72 W/CM < CLAD MID. TEMP. (HOT SPOT) > 645.49 DEG-C

< BURNUP > (1) AVERAGE --- 9.973D+04 (MWD/MTM)
 (2) LOCAL --- 8.466D+04 (MWD/MTM)

< HOOP STRESS LIMIT VALUE > HOT SPOT TEMP. BASE NOMINAL TEMP. BASE
 SM* SY* SM* SY*
 15.724 27.213 16.985 28.662

< AXIAL POWER DISTRIBUTION >
 { NODE NO } 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
 { VALUE } 0.131 0.538 0.710 0.892 0.977 1.000 0.977 0.892 0.710 0.538
 { NODE NO } 11
 { VALUE } 0.131

< MAIN RESULTS >

	BASE CALC.	SENS. 1	SENS. 2	SENS. 3	SENS. 4	SENS. 5	SENS. 6
1) PEAK LINEAR HEAT RATE (MODIFIED) (W/CM)	415.48	415.48	419.33	415.48	415.48	415.48	415.48
2) CLAD MIDWALL TEMP. AT CORE TOP (MOD.) (DEG-C)	644.1	644.1	644.1	645.5	644.1	644.1	644.1
3) CLAD OUTER TEMP. AT CORE TOP (CALC.) (DEG-C)	635.9	635.9	635.9	637.3	635.9	635.9	635.9
4) CLAD INNER CORROSION DEPTH (FCCI) (MICRO-M)	65.00	65.00	65.00	65.00	100.00	65.00	65.00
5) CLAD OUTER CORROSION DEPTH (BY NA) (MICRO-M)	75.77	75.77	75.77	77.91	75.77	109.59	75.77
6) CLAD THICKNESS (MM)	0.309	0.279	0.309	0.307	0.274	0.275	0.309
7) CLAD INNER DIAMETER (MM)	7.530	7.590	7.530	7.530	7.600	7.530	7.530
8) CLAD OUTER DIAMETER (MM)	8.148	8.148	8.148	8.144	8.148	8.081	8.148
9) FP GAS RELEASE RATE FROM CORE FUEL (-)	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.986
10) CLAD INNER PRESSURE (KGF/CM2)	53.76	53.76	54.20	54.00	53.76	53.76	59.21
11) HOOP STRESS (KGF/MM2)	6.814	7.575	6.870	6.890	7.718	7.617	7.505
12) TIME TO RUPTURE (SR-BASE) (HOUR)	1.670D+06	1.199D+06	1.628D+06	1.463D+06	1.130D+06	1.178D+06	1.234D+06
13) TIME TO RUPTURE (ST-BASE) (HOUR)	8.299D+05	5.955D+05	8.087D+05	7.276D+05	5.616D+05	5.851D+05	6.130D+05
14) CDF (SR-BASE) (-)	2.134D-02	2.875D-02	2.187D-02	2.437D-02	3.029D-02	2.770D-02	2.865D-02
15) CDF (ST-BASE) (-)	4.184D-02	5.636D-02	4.287D-02	4.773D-02	5.939D-02	5.430D-02	5.616D-02

TIME (DAY)	TEMP (DEG-C)	HOOP STRESS (KGF/MM2)								<= RUPTURE TIME (HOUR) =>		<===== CDF (-) =====>	
		BASE	1	2	3	4	5	6	MODIFIED	SR-BASE	ST-BASE	SR-BASE	ST-BASE
1000.0	645.5	6.814	7.575	6.870	6.890	7.718	7.617	7.505	8.404	7.8563D+05	3.9063D+05	4.2272D-02	8.2786D-02
1010.0	646.5	6.887	7.657	6.944	6.964	7.802	7.706	7.588	8.499	7.0782D+05	3.5194D+05	4.2594D-02	8.3433D-02
1020.0	647.4	6.960	7.740	7.018	7.039	7.886	7.795	7.666	8.595	6.3793D+05	3.1677D+05	4.2952D-02	8.4152D-02
1030.0	648.4	7.034	7.823	7.092	7.114	7.971	7.885	7.748	8.691	5.7513D+05	2.8482D+05	4.3348D-02	8.4952D-02
1040.0	649.4	7.108	7.907	7.167	7.189	8.057	7.976	7.829	8.788	5.1868D+05	2.5584D+05	4.3788D-02	8.5841D-02
1050.0	650.3	7.182	7.991	7.242	7.265	8.143	8.067	7.912	8.886	4.6792D+05	2.2959D+05	4.4275D-02	8.6832D-02
1060.0	651.3	7.257	8.076	7.318	7.341	8.230	8.160	7.994	8.985	4.2225D+05	2.0582D+05	4.4816D-02	8.7936D-02
1070.0	652.2	7.333	8.161	7.394	7.418	8.317	8.253	8.078	9.085	3.8115D+05	1.8434D+05	4.5414D-02	8.9169D-02
1080.0	653.2	7.409	8.247	7.471	7.495	8.405	8.348	8.161	9.185	3.4414D+05	1.6493D+05	4.6077D-02	9.0546D-02
1090.0	654.2	7.485	8.334	7.548	7.573	8.494	8.443	8.246	9.287	3.1082D+05	1.4743D+05	4.6811D-02	9.2086D-02
1100.0	655.1	7.562	8.421	7.625	7.651	8.583	8.539	8.331	9.390	2.8079D+05	1.3165D+05	4.7624D-02	9.3809D-02
1110.0	656.1	7.639	8.509	7.703	7.730	8.673	8.637	8.416	9.493	2.5373D+05	1.1745D+05	4.8523D-02	9.5740D-02
1120.0	657.1	7.717	8.598	7.782	7.810	8.764	8.735	8.502	9.598	2.2934D+05	1.0467D+05	4.9519D-02	9.7906D-02
1130.0	658.0	7.796	8.687	7.861	7.890	8.855	8.835	8.589	9.703	2.0733D+05	9.3190D+04	5.0620D-02	1.0034D-01
1140.0	659.0	7.875	8.777	7.941	7.970	8.948	8.935	8.677	9.810	1.8748D+05	8.2886D+04	5.1838D-02	1.0307D-01
1150.0	660.0	7.955	8.868	8.022	8.052	9.040	9.037	8.765	9.918	1.6957D+05	7.3647D+04	5.3184D-02	1.0614D-01
1160.0	660.9	8.035	8.960	8.103	8.134	9.134	9.140	8.854	10.027	1.5340D+05	6.5370D+04	5.4673D-02	1.0960D-01
1170.0	661.9	8.116	9.052	8.185	8.216	9.229	9.244	8.943	10.137	1.3880D+05	5.7964D+04	5.6318D-02	1.1350D-01
1180.0	662.9	8.198	9.145	8.267	8.300	9.324	9.350	9.033	10.249	1.2562D+05	5.1343D+04	5.8137D-02	1.1791D-01
1190.0	663.8	8.280	9.240	8.350	8.384	9.421	9.457	9.124	10.362	1.1370D+05	4.5430D+04	6.0146D-02	1.2288D-01
1200.0	664.8	8.363	9.334	8.434	8.468	9.518	9.565	9.216	10.476	1.0294D+05	4.0155D+04	6.2365D-02	1.2850D-01
1210.0	665.8	8.447	9.430	8.518	8.554	9.616	9.675	9.309	10.592	9.3144D+04	3.5454D+04	6.4817D-02	1.3486D-01
1220.0	666.7	8.531	9.527	8.604	8.640	9.715	9.786	9.402	10.709	8.4212D+04	3.1268D+04	6.7528D-02	1.4208D-01
1230.0	667.7	8.617	9.625	8.690	8.727	9.815	9.899	9.497	10.828	7.6049D+04	2.7545D+04	7.0528D-02	1.5026D-01

1240.0	668.6	{	8.703	9.724	8.777	8.815	9.917	10.014	9.592	}	10.948	6.8599D+04	2.4237D+04	7.3852D-02	1.5955D-01
1250.0	669.6	{	8.790	9.823	8.864	8.904	10.019	10.130	9.688	}	11.070	6.1807D+04	2.1301D+04	7.7539D-02	1.7012D-01
1260.0	670.6	{	8.877	9.924	8.953	8.994	10.122	10.248	9.785	}	11.194	5.5621D+04	1.8699D+04	8.1634D-02	1.8216D-01
1270.0	671.5	{	8.966	10.026	9.042	9.084	10.227	10.367	9.883	}	11.319	4.9994D+04	1.6394D+04	8.6187D-02	1.9587D-01
1280.0	672.5	{	9.055	10.129	9.132	9.176	10.332	10.489	9.982	}	11.446	4.4882D+04	1.4355D+04	9.1256D-02	2.1153D-01
1290.0	673.5	{	9.146	10.233	9.224	9.268	10.439	10.612	10.082	}	11.575	4.0242D+04	1.2554D+04	9.6905D-02	2.2942D-01
1300.0	674.4	{	9.237	10.339	9.316	9.362	10.547	10.737	10.183	}	11.706	3.6036D+04	1.0964D+04	1.0321D-01	2.4989D-01
1310.0	675.4	{	9.330	10.445	9.409	9.456	10.657	10.865	10.285	}	11.840	3.2228D+04	9.5628D+03	1.1026D-01	2.7334D-01
1320.0	676.4	{	9.423	10.553	9.503	9.552	10.768	10.994	10.389	}	11.975	2.8784D+04	8.3290D+03	1.1814D-01	3.0025D-01
1330.0	677.3	{	9.517	10.663	9.598	9.649	10.880	11.126	10.493	}	12.112	2.5673D+04	7.2440D+03	1.2697D-01	3.3117D-01
1340.0	678.3	{	9.613	10.773	9.695	9.747	10.993	11.260	10.599	}	12.252	2.2867D+04	6.2911D+03	1.3688D-01	3.6675D-01
1350.0	679.3	{	9.709	10.885	9.792	9.846	11.109	11.397	10.706	}	12.394	2.0339D+04	5.4553D+03	1.4801D-01	4.0775D-01
1360.0	680.2	{	9.807	10.999	9.891	9.946	11.225	11.536	10.814	}	12.538	1.8064D+04	4.7233D+03	1.6054D-01	4.5506D-01

 * OUTPUT TIME 8 * 1368.00 DAY (32832.00 HOUR) <== INPUT TIME POINT 6

< PEAK POWER (NOMINAL) > 405.00 W/CM < CLAD MID. TEMP. (HOT SPOT) > 681.00 DEG-C

< BURNUP > (1) AVERAGE --- 1.354D+06 (MWD/MTM)
 (2) LOCAL --- 8.782D+04 (MWD/MTM)

< HOOP STRESS LIMIT VALUE > HOT SPOT TEMP. BASE NOMINAL TEMP. BASE
 SM* SY* SM* SY*
 14.519 24.935 15.956 26.738

< AXIAL POWER DISTRIBUTION >
 { NODE NO } 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
 { VALUE } 0.131 0.538 0.710 0.892 0.977 1.000 0.977 0.892 0.710 0.538
 { NODE NO } 11
 { VALUE } 0.131

< MAIN RESULTS >

	BASE CALC.	SENS. 1	SENS. 2	SENS. 3	SENS. 4	SENS. 5	SENS. 6
1) PEAK LINEAR HEAT RATE (MODIFIED) (W/CM)	451.47	451.47	455.64	451.47	451.47	451.47	451.47
2) CLAD MIDWALL TEMP. AT CORE TOP (MOD.) (DEG-C)	679.5	679.5	679.5	681.0	679.5	679.5	679.5
3) CLAD OUTER TEMP. AT CORE TOP (CALC.) (DEG-C)	670.7	670.7	670.7	672.2	670.7	670.7	670.7
4) CLAD INNER CORROSION DEPTH (FCCI) (MICRO-M)	65.00	65.00	65.00	65.00	100.00	65.00	65.00
5) CLAD OUTER CORROSION DEPTH (BY NA) (MICRO-M)	99.79	99.79	99.79	102.61	99.79	144.33	99.79
6) CLAD THICKNESS (MM)	0.285	0.255	0.285	0.282	0.250	0.241	0.285
7) CLAD INNER DIAMETER (MM)	7.530	7.590	7.530	7.530	7.800	7.530	7.530
8) CLAD OUTER DIAMETER (MM)	8.100	8.100	8.100	8.095	8.100	8.011	8.100
9) FP GAS RELEASE RATE FROM CORE FUEL (-)	0.899	0.899	0.899	0.899	0.899	0.899	0.999
10) CLAD INNER PRESSURE (KGF/CM2)	72.16	72.16	72.77	72.49	72.16	72.16	79.57
11) HOOP STRESS (KGF/MM2)	9.886	11.091	9.971	10.027	11.320	11.649	10.901
12) TIME TO RUPTURE (SR-BASE) (HOUR)	4.578D+04	3.185D+04	4.462D+04	3.966D+04	2.953D+04	2.637D+04	3.382D+04
13) TIME TO RUPTURE (ST-BASE) (HOUR)	2.033D+04	1.105D+04	1.953D+04	1.721D+04	9.775D+03	8.167D+03	1.221D+04
14) CDF (SR-BASE) (-)	7.470D-02	1.040D-01	7.661D-02	8.576D-02	1.106D-01	1.125D-01	1.005D-01
15) CDF (ST-BASE) (-)	1.529D-01	2.404D-01	1.577D-01	1.771D-01	2.634D-01	2.797D-01	2.268D-01

TIME TEMP <===== HOOP STRESS (KGF/MM2) =====> <= RUPTURE TIME (HOUR) => <===== CDF (-) =====>

(DAY)	(DEG-C)	BASE	1	2	3	4	5	6	MODIFIED	SR-BASE	ST-BASE	SR-BASE	ST-BASE
1368.0	681.0	(9.886	11.091	9.971	10.027	11.320	11.649	10.901)	12.656	1.6411D+04	4.2042D+03	1.7170D-01	4.9817D-01

⑥ 計算結果(過渡変化時計算)

 * TRANSIENT CALCULATION RESULTS OUTPUT *

GAMMA-SU & GAMMA-SY VALUES FOR CALC. HOOP STRESS LIMIT VALUES > ← 短時間強度劣化係数 γ_{Su} , γ_{Sy}

HOT SPOT TEMP. BASE GAMMA-SU = 0.6700 GAMMA-SY = 0.6300
 NOMINAL TEMP. BASE GAMMA-SU = 0.6792 GAMMA-SY = 0.6577

< TRANSIENT CALC. TIME 1 > 1368.0000 DAY (INPUT VALUE) ==> 1368.0000 DAY (REAL VALUE) ← 過渡変化想定時刻(入力値と実際の値)
 HOOP STRESS (KGF/MM2) 12.656

CDF (-) SR-BASE 1.7170D-01 ST-BASE 4.9817D-01 ← 過渡変化を考慮しないCDF値(S_R ベース、 S_T ベース)

-- HISTORY -- 1 以下は、各過渡履歴パターン毎に、過渡履歴の各時刻点における、被覆管周方向応力制限値、過渡変化のみに起因する被覆管破断時間、CDF

TIME (SEC)	TEMP. (DEG-C)	<===== HOOP STRESS LIMIT VALUE (KGF/MM2) =====>				<== RUPTURE TIME (SEC) ==>		<===== CDF (-) =====>	
		SM* (HOT)	SY* (HOT)	SM* (NOMINAL)	SY* (NOMINAL)	SR-BASE	ST-BASE	SR-BASE	ST-BASE
0.000	700.00	13.778	23.556	14.383	23.881	5.6970D+04	1.4242D+04	0.0000D+00	0.0000D+00
0.500	710.00	13.364	22.790	13.951	23.104	3.1598D+04	7.9086D+03	1.1970D-05	4.7851D-05
1.000	740.00	12.043	20.343	12.572	20.623	5.7538D+03	1.4428D+03	5.4113D-05	2.1599D-04
1.400	745.00	11.814	19.917	12.333	20.191	4.3711D+03	1.0962D+03	1.3415D-04	5.3515D-04
1.500	746.25	11.756	19.810	12.273	20.082	4.0824D+03	1.0238D+03	1.5783D-04	6.2958D-04
1.800	750.00	11.583	19.486	12.092	19.755	3.3289D+03	8.3485D+02	2.3937D-04	9.5470D-04
2.000	750.00	11.583	19.486	12.092	19.755	3.3289D+03	8.3485D+02	2.9944D-04	1.1943D-03
2.400	750.00	11.583	19.486	12.092	19.755	3.3289D+03	8.3485D+02	4.1960D-04	1.6734D-03
2.500	749.23	11.619	19.553	12.129	19.822	3.4708D+03	8.7044D+02	4.4903D-04	1.7907D-03
3.000	745.38	11.796	19.884	12.314	20.158	4.2801D+03	1.0734D+03	5.7901D-04	2.3090D-03
3.500	741.54	11.973	20.212	12.498	20.491	5.2858D+03	1.3255D+03	6.8434D-04	2.7290D-03
4.000	737.69	12.148	20.538	12.682	20.821	6.5374D+03	1.6392D+03	7.6957D-04	3.0689D-03
4.500	733.85	12.322	20.861	12.863	21.148	8.0976D+03	2.0302D+03	8.3844D-04	3.3436D-03
5.000	730.00	12.496	21.181	13.044	21.472	1.0045D+04	2.5180D+03	8.9399D-04	3.5652D-03
5.500	727.00	12.628	21.428	13.183	21.723	1.1897D+04	2.9817D+03	9.3979D-04	3.7479D-03
6.000	724.00	12.761	21.674	13.321	21.972	1.4104D+04	3.5341D+03	9.7844D-04	3.9021D-03
6.500	721.00	12.892	21.917	13.459	22.218	1.6735D+04	4.1926D+03	1.0110D-03	4.0322D-03
7.000	718.00	13.023	22.158	13.595	22.463	1.9877D+04	4.9785D+03	1.0385D-03	4.1418D-03
7.500	715.00	13.152	22.397	13.729	22.705	2.3631D+04	5.9174D+03	1.0616D-03	4.2340D-03
8.000	712.00	13.280	22.633	13.863	22.945	2.8122D+04	7.0400D+03	1.0810D-03	4.3116D-03
8.500	709.00	13.406	22.868	13.995	23.183	3.3500D+04	8.3836D+03	1.0973D-03	4.3768D-03
9.000	706.00	13.532	23.100	14.126	23.418	3.9946D+04	9.9935D+03	1.1110D-03	4.4315D-03
9.500	703.00	13.656	23.329	14.255	23.650	4.7680D+04	1.1924D+04	1.1225D-03	4.4774D-03
10.000	700.00	13.778	23.556	14.383	23.881	5.6970D+04	1.4242D+04	1.1321D-03	4.5158D-03

* INCREASE OF CDF BY TRANSIENT CONDITION AT THIS TIME POINT ==> この時刻点における全過渡履歴パターンに起因するCDF
 SR-BASE 1.1321D-03 ST-BASE 4.5158D-03

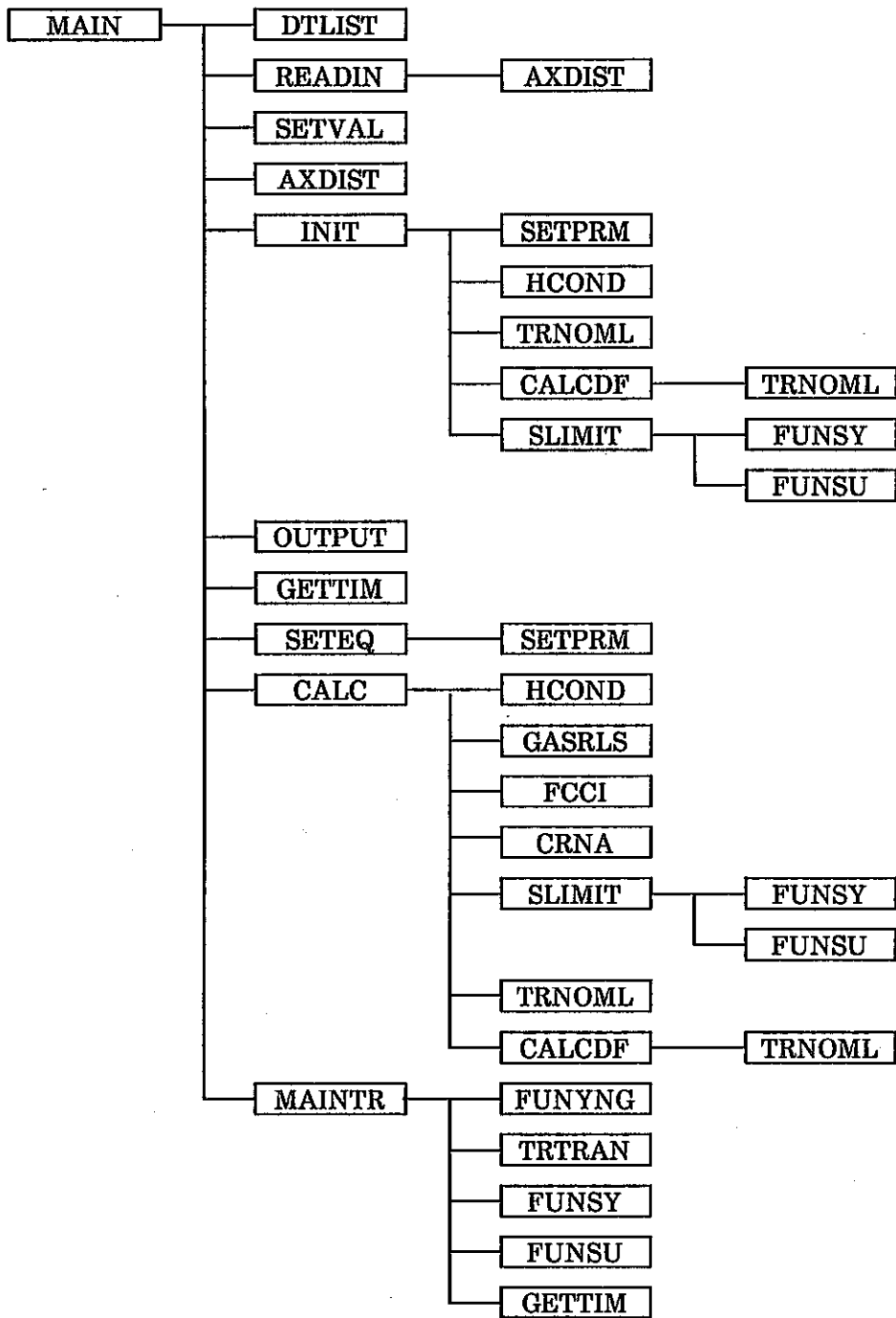
* TOTAL CDF UNTIL THIS TIME POINT (NORMAL OPERATION + TRANSIENT) ==> この時点までの通常運転条件によるCDFと全過渡履歴パターンに起因するCDFの和
SR-BASE 1.7283D-01 ST-BASE 5.0268D-01

* FINAL CDF (NORMAL OPERATION + TRANSIENT) ==> 寿命末期における通常運転条件によるCDFと全過渡履歴パターンに起因するCDFの和
SR-BASE 1.7283D-01 ST-BASE 5.0268D-01

G プログラム説明

G.1 処理概要

ツリー構造を下記に、また各ルーチンの処理概要を次頁に示す。



HOPEコードのツリー構造図

各ルーチンの処理概要

ルーチン名	概要
AXDIST	入力データで与えた軸方向出力分布を1で規格化し、各計算時刻点における軸方向出力分布を求める。
BLOCK DATA	コモン変数の初期値、デフォルト値を設定する。
CALC	ある時刻点における周方向応力、その時刻点までのCDF等の値を基準条件及び各感度解析条件についてそれぞれ計算する。
CALCDF	CALCルーチンにおいて求めた基準計算及び各感度解析の場合の周方向応力値より確定論的周方向応力上限値を算出し、その応力値を用いて得られたクリープ破断時間から確定論的CDF上限値を計算する。
CRNA	2時刻間のNa腐食による被覆管外面腐食量を算出する。
DTLIST	入力データのエコー印刷とワークファイル(unit 1)への書き出しを行う。
FCCI	局所燃焼度に応じた被覆管内面腐食量を算出する。
FUNSU	被覆管の設計降伏点 S_y を求める。
FUNSY	被覆管の設計引張強さ S_u を求める。
FUNYNG	温度750°Cにおけるヤング率に対する温度T°Cにおけるヤング率の比を求める。(過渡変化を考慮したCDF計算を実施する場合のみコールされる。)
GASRLS	燃料ペレットからのガス放出率を算出する。
GETTIM	周方向応力、CDF等を計算する時刻点を設定する。
HCOND	被覆管の熱伝導度を計算する。
INIT	時刻ゼロ(運転開始時刻)における諸量の初期値を設定する。
MAIN	本コードのメインルーチン。
MAINTR	過渡変化を考慮したCDF計算を行う。
OUTPUT	通常運転時の計算結果を印刷する。(過渡変化を考慮したCDF計算結果の印刷はMAINTRルーチンにて行う。)
READIN	入力データ読み込みと、入力情報印刷を行う。
SETEQ	計算に用いる諸物性式と、式に使用する常数を設定する。
SETPRM	物性式の常数を格納する配列変数から、実際に使用する常数を選択し、別の配列変数に格納する。
SETVAL	基準計算、各感度解析全7ケースの各ケースの計算に先立って条件を設定する。
SLIMIT	設計応力強さ S_m^* 、及び設計降伏点 S_y^* を求める。
TRNOML	通常運転時のクリープ破断時間を計算する。
TRTRAN	過渡変化時のクリープ破断時間を計算する。

C.2 コモン変数

コモン変数を以下に示す。尚、変数の型を

I : 4バイト整数

R*4 : 単精度実数

R*8 : 倍精度実数

C*n : nバイトの文字

と略記した。

(1) COMMON /AXIAL/

変数名	配列	型	内 容	単 位
ZLEN	50	R*8	軸方向各ノードの長さ	cm
RPWR	50,10	R*8	各時刻(入力値)における軸方向相対出力分布	—
RATE	50	R*8	ある計算時刻における軸方向相対出力分布	—
SLEN	—	R*8	炉心燃料スタック長	cm
SLENB	—	R*8	軸ブランケット燃料スタック長	cm
TZLEN	—	R*8	燃料スタック全長(炉心部+ブランケット部)	cm
RBRNLO	—	R*8	1つ前の計算時刻における炉心上端部燃焼度のピーキングファクター	—
RBURNL	—	R*8	現在の計算時刻における炉心上端部燃焼度のピーキングファクター	—
ARBRNL	—	R*8	1つ前の計算時刻と現在の計算時刻の平均の炉心上端部燃焼度ピーキングファクター	—
SRLNO	—	R*8	1つ前の計算時刻における炉心部全体の出力比	cm
SRLN	—	R*8	現在の計算時刻における炉心部全体の出力比	cm
ASRLN	—	R*8	1つ前の計算時刻と現在の計算時刻の平均の炉心部全体の出力比	cm
SRLNBO	—	R*8	1つ前の計算時刻におけるブランケット部全体の出力比	cm
SRLENB	—	R*8	現在の計算時刻におけるブランケット部全体の出力比	cm
ASRLNB	—	R*8	1つ前の計算時刻と現在の計算時刻の平均のブランケット部全体の出力比	cm
RMAX	—	R*8	軸方向出力が最大となるノードの相対出力	—
JHIGH	—	I	炉心燃料スタック部の上端ノード番号	—
JLOW	—	I	炉心燃料スタック部の下端ノード番号	—
NZ	—	I	軸方向の全ノード数(炉心部+ブランケット部)	—

(2) COMMON /CHARA/

変数名	配列	型	内 容	単 位
ITEM	15	C*50	計算結果印刷用のタイトル	—
COND1	14	C*41	計算条件印刷用のタイトル1	—
COND2	6	C*41	計算条件印刷用のタイトル2	—
COND3	4	C*45	計算条件印刷用のタイトル3	—
COND4	9	C*58	計算条件印刷用のタイトル4	—

(3) COMMON /CLAD/

変数名	配列	型	内 容	単 位
THICKN	—	R*8	被覆管肉厚ノミナル値	mm
THICKL	—	R*8	被覆管肉厚下限値	mm
THICK0	7	R*8	基準計算、感度解析の各ケースにおける初期の被覆管肉厚	mm
THICK	7	R*8	基準計算、感度解析の各ケースにおけるある計算時刻の被覆管肉厚	mm
CDIAON	—	R*8	被覆管外径ノミナル値	mm
CDIAOU	—	R*8	被覆管外径上限値	mm
CDIAO	7	R*8	基準計算、感度解析の各ケースにおける初期の被覆管外径	mm
CDIAI	7	R*8	基準計算、感度解析の各ケースにおける初期の被覆管内径	mm
CRADO0	7	R*8	基準計算、感度解析の各ケースにおける初期の被覆管外半径	mm
CRADO	7	R*8	基準計算、感度解析の各ケースにおけるある計算時刻の被覆管外半径	mm
CRADIO	7	R*8	基準計算、感度解析の各ケースにおける初期の被覆管内半径	mm
CRADI	7	R*8	基準計算、感度解析の各ケースにおけるある計算時刻の被覆管内半径	mm
CRADON	—	R*8	被覆管外半径ノミナル値	mm

(4) COMMON /EQPARA/

変数名	配列	型	内 容	単位
PARM	20,10,9	R*8	予め物性式の定数を定義した配列変数	—
PARA	20,9	R*8	実際の計算の際に用いるPARMから選択された定数を格納するための配列変数	—
NPARM	10,9	I	PARMで定義された定数の数を格納している配列変数	—
NOEQ	9	I	9つの項目の物性式についてそれぞれ何番目の式を使用するかを設定する配列変数	—
IBASE	9	I	選択された物性式の定数のうち基準計算において使用する定数の番号を設定する配列変数	—
ISENS	3	I	選択された物性式の定数のうち感度解析において使用する定数の番号を設定する配列変数	—

(5) COMMON /FPGAS/

変数名	配列	型	内 容	単位
PRHE	—	R*8	製作時Heガス封入圧力(at 20°C)	kgf/cm ²
PRCLDO	—	R*8	運転時被覆管外圧	kgf/cm ²
GSIMPF	—	R*8	炉心燃料ペレットに含まれる蒸発性不純物量	μl/g-oxide
GSIMPB	—	R*8	ブランケット燃料ペレットに含まれる蒸発性不純物量	μl/g-oxide
VLP	—	R*8	下部ガスプレナム有効容積	cm ³
TIN	—	R*8	冷却材入口温度(プレナムガス温度)	°C
PRESS0	—	R*8	運転開始時の被覆管内圧-外圧差	kgf/cm ²
C1	—	R*8	発生熱量1joule当たりの燃料モル数	mol/joule
C2	—	R*8		(MWD/MTM /WD)
CMOLPR	—	R*8	1モルの燃料当たりの被覆管内圧	kgf/cm ² /mol
PWRCMF	7	R*8	基準計算、各感度解析ごとの任意の計算時刻における炉心燃料全体の出力	
PWRCMB	7	R*8	基準計算、各感度解析ごとの任意の計算時刻におけるブランケット燃料全体の出力	

(6) COMMON /FUEL/

変数名	配列	型	内 容	単 位
FDIAON	—	R*8	燃料ペレット径ノミナル値	mm
FDIAOU	—	R*8	燃料ペレット径上限値	mm
FDIAO	7	R*8	基準計算、各感度解析ごとの燃料ペレット径	mm
RFUEL	7	R*8	基準計算、各感度解析ごとの燃料ペレット半径	cm
RHON	—	R*8	燃料ペレット対理論密度比ノミナル値	%TD
RHOU	—	R*8	燃料ペレット対理論密度比上限値	%TD
PUN	—	R*8	燃料ペレットPuO ₂ 富化度ノミナル値	—
PUU	—	R*8	燃料ペレットPuO ₂ 富化度上限値	—
OM	—	R*8	燃料ペレットO/M比	—
STACK	7	R*8	基準計算、各感度解析ごとの炉心燃料スタック長	cm
STACKU	—	R*8	炉心燃料スタック長上限値	cm

(7) COMMON /ICONST/

変数名	配列	型	内 容	単 位
ATMFIS	—	R*8	核分裂当たりのガス原子生成数	atoms/fission
ENGFIS	—	R*8	核分裂当たりの発生エネルギー	MeV/fission
GAMMA	—	R*8	炉内環境効果によるクリープ強度劣化係数	—
STSR	—	R*8	S _R ベース応力からS _t ベース応力への換算係数	—

(8) COMMON /INPTBL/

変数名	配列	型	内 容	単 位
TIMTBL	10	R*8	履歴時刻(入力値)	day
TCTBL	10	R*8	炉心上端部の被覆管肉厚中心温度履歴	°C
PWRTBL	10	R*8	ピーク線出力履歴(ノミナル値)	W/cm
NTBL	—	I	入力履歴点数	—

(9) COMMON /MODIF/

変数名	配列	型	内 容	単位
QTERR	—	R*8	熱出力誤差	%
QLERR	—	R*8	核計算誤差	%
RPOWER	7	R*8	基準計算、各感度解析ごとの線出力を求める場合の係数	—
RTEMP	7	R*8	基準計算、各感度解析ごとの被覆管肉厚中心温度を求める場合の係数	—
RGASRL	7	R*8	基準計算、各感度解析ごとのFPガス放出率を求める場合の係数	—
RBURN	—	R*8	燃焼度を求める場合の係数	—
TCOEF	—	R*8	ホットスポット温度からノミナル温度へ換算する際の係数	—

(10) COMMON /RESULT/

変数名	配列	型	内 容	単 位
POWER	7	R*8	線出力	W/cm
TCMID	7	R*8	被覆管肉厚中心温度	°C
TCOUT1	7	R*8	1つ前の計算時刻における被覆管外面温度	°C
TCOUT2	7	R*8	現在の計算時刻における被覆管外面温度	°C
BURNA	7	R*8	平均燃焼度	MWD/MTM
BURNL	7	R*8	炉心上端部局所燃焼度	MWD/MTM
RELEASE	7	R*8	FPガス放出率	—
PRESS	7	R*8	被覆管内圧	kgf/cm ²
CORIN	7	R*8	被覆管内半径	mm
COROUT	7	R*8	被覆管外半径	mm
SIGHP	7	R*8	被覆管周方向応力	kgf/mm ²
TR1	2,7	R*8	1つ前の計算時刻における被覆管破断時間	hour
TR2	2,7	R*8	現在の計算時刻における被覆管破断時間	hour
CDFSR	7	R*8	S _R ベースCDF値	—
CDFST	7	R*8	S _T ベースCDF値	—
TRM1	2	R*8	1つ前の計算時刻における被覆管破断時間(上限値)	hour
TRM2	2	R*8	現在の計算時刻における被覆管破断時間(上限値)	hour
HMOD	2	R*8	被覆管周方向応力(上限値)	kgf/mm ²
CMODSR	2	R*8	S _R ベースCDF値(上限値)	—
CMODST	2	R*8	S _T ベースCDF値(上限値)	—

(11) COMMON /SIGLMT/

変数名	配列	型	内 容	単位
TMAX	2	R*8	現在の計算時刻までの被覆管肉厚中心最高温度	°C
TNOW	2	R*8	現在の計算時刻における被覆管肉厚中心温度	°C
GAMSU	2	R*8	設計引張り強さ S_u に対する短時間強度補正係数 γS_u	—
GAMSY	2	R*8	設計降伏応力 S_y に対する短時間強度補正係数 γS_y	—
SIGSM	2	R*8	設計応力強さ S_m^*	kgf/mm ²
SIGSY	2	R*8	設計降伏応力 S_y^*	kgf/mm ²

(12) COMMON /TIMDAT/

変数名	配列	型	内 容	単位
TIME0	—	R*8	1つ前の計算時刻	day
TIME	—	R*8	現在の計算時刻	day
DTNML	3	R*8	通常運転時の計算を行う場合の計算時刻、結果印刷時刻設定用データ	day
DTTRN	2	R*8	過渡変化時の計算を行う場合の計算時刻、結果印刷時刻設定用データ	day
POWIN0	—	R*8	1つ前の計算時刻におけるピーク線出力	W/cm
POWINP	—	R*8	現在の計算時刻におけるピーク線出力	W/cm
TMPIN0	—	R*8	1つ前の計算時刻における被覆管肉厚中心温度	°C
TMPINP	—	R*8	現在の計算時刻における被覆管肉厚中心温度	°C
TMPMAX	—	R*8	現在までの被覆管肉厚中心温度HS値	°C
TIMET	10	R*8	過渡変化を想定する時刻(入力値)	day
TIMETN	10	R*8	過渡変化を想定する時刻(実際の値)	day
HOOPT	10	R*8	過渡変化を想定する各時刻における周方向応力	kgf/cm ²
CDFSRT	10	R*8	過渡変化を想定する各時刻におけるS _R ベースCDF	—
CDFSTT	10	R*8	過渡変化を想定する各時刻におけるS _T ベースCDF	—
TTIME	100,10, 10	R*8	過渡変化の入力時刻点	sec
TTEMP	100,10, 10	R*8	過渡変化の入力時刻点TTIMEにおける被覆管肉厚中心温度	°C
TA	100	R*8	通常運転時用入力時刻TIMTBLと同じ値が設定される(過渡計算時刻を設定するために使用)	day
NTIMET	—	I	過渡変化の入力時刻点数	—
NPAT	10	I	各過渡変化想定時刻における過渡履歴数	—
NPOINT	10,10	I	各過渡変化想定時刻の各過渡履歴数についての時刻点数	—
ISSET	10	I	過渡計算時刻設定用フラグ	—
NOTRAN	—	I	過渡計算実施判定用フラグ(=0の時実施する)	—

(13) COMMON /TRNCAL/

変数名	配列	型	内 容	単位
CDFTR	2	R*8	任意の過渡変化想定時刻の該当する過渡変化履歴のみに起因するCDF値	—
CDFTRT	2	R*8	任意の過渡変化想定時刻の全ての過渡変化履歴に起因するCDF値	—
CDFTTL	2	R*8	任意の過渡変化想定時刻の全ての過渡変化履歴に起因するCDFと、その時刻における通常運転によるCDFとの和	—
RUPTM0	2	R*8	1つ前の過渡変化時刻点における過渡変化のみに起因する被覆管破断時間	sec
RUPTM1	2	R*8	現在の過渡変化時刻点における過渡変化のみに起因する被覆管破断時間	sec

G.3 ルーチン説明

以下の記述では変数の型を

I : 4バイト整数

R*4 : 単精度実数

R*8 : 倍精度実数

C*n : nバイトの文字

と略記した。

又、引数の受け渡しを

I : 親ルーチンから値を受け取る引数

O : 親ルーチンに値を返す引数

I/O : 値が更新される引数

と表記した。

ルーチン名	SUBROUTINE AXDIST(IT, IFL)				
Calls	なし	Called by	MAIN, READIN		
使用コモン	AXIAL, INPTBL, TIMDAT				
処理内容	入力で与えられた軸方向出力分布データを1.0で規格化し、各計算時刻点における出力分布と炉心上端部の出力比を求める。				
引数名	配列	型	I/O	内容	単位
IT	-	I	I	計算時刻点No.を表す添字	-
IFL	-	I	I	IFL=0: 軸方向出力分布相対値を1.0で規格化する IFL=1: 炉心上端部の出力比を計算する	-

ルーチン名	SUBROUTINE CALC(IC)				
Calls	HCOND, GASRLS, FCCI, CRNA, SLIMIT, TRNOML, CALCDF			Called by	MAIN
使用コモン	AXIAL, CLAD, EQPARA, FPGAS, FUEL, ICONST, INPTBL, MODIF, RESULT, SIGLMT, TIMDAT, TRNCAL				
処理内容	ある時刻における燃焼度、被覆管内外面腐食量、等から周方向応力を計算し、CDFを求める。(基準計算、各感度解析条件ごとに計算する。)				
引数名	配列	型	I/O	内容	単位
IC	7	I	I	基準計算、各感度解析のNo.を表す添字 IC=1:基準計算、IC=2~7:感度解析1~6	-

ルーチン名	SUBROUTINE CALCDF(SIG, TIM1, TIM2, TEMP)				
Calls	TRNOML			Called by	CALC, INIT
使用コモン	CLAD, EQPARA, FPGAS, FUEL, MODIF, RESULT, SIGLMT, TRNCAL				
処理内容	基準計算、各感度解析で得られたそれぞれの周方向応力値から周方向応力の上限值を統計処理で求め、その応力値を用いてCDFの評価値を計算する。				
引数名	配列	型	I/O	内容	単位
SIG	7	R*8	I	基準計算、感度解析における周方向応力値	kgf/mm ²
TIM1	-	R*8	I	前の計算時刻	hour
TIM2	-	R*8	I	後の計算時刻	hour
TEMP	-	R*8	I	被覆管肉厚中心温度ホットスポット値	°C

ルーチン名	FUNCTION CRNA (NO, P, TEMP1, TEMP2, TIME1, TIME2)				
Calls	なし			Called by	CALC
使用コモン	なし				
処理内容	被覆管外面温度から2時刻間の外面腐食量 CRNA (cm) を算出する。				
引数名	配列	型	I/O	内容	単位
NO	-	I	I	被覆管外面腐食式番号 (NO ≤ 20)	-
P	20	R*8	I	被覆管外面腐食式の係数	-
TEMP1	-	R*8	I	時刻 TIME1 における被覆管外面温度	°C
TEMP2	-	R*8	I	時刻 TIME2 における被覆管外面温度	°C
TIME1	-	R*8	I	前の時刻	day
TIME2	-	R*8	I	後の時刻	day

ルーチン名	SUBROUTINE DTLIST				
Calls	なし			Called by	MAIN
使用コモン	なし				
処理内容	カードイメージ入力データを読み込み、エコー印刷とワークファイル(unit 1)への書き込みを行う。				
引数名	配列	型	I/O	内容	単位
なし					

ルーチン名	FUNCTION FCCI (NO, P, BURNL)				
Calls	なし			Called by	CALC
使用コモン	なし				
処理内容	局所燃焼度から被覆管内面腐食量 FCCI (cm) を算出する。				
引数名	配列	型	I/O	内容	単位
NO	-	I	I	被覆管内面腐食式番号 (NO ≤ 20)	-
P	20	R*8	I	被覆管内面腐食式の係数	-
BURNL	-	R*8	I	炉心上端部局所燃焼度	MWD/MTM

ルーチン名	FUNCTION FUNSU (NO, P, TEMP)				
Calls	なし		Called by	MAINTR, SLIMIT	
使用コモン	なし				
処理内容	温度 TEMP (°C) における被覆管の設計引張強さ FUNSU (kgf/mm ²) を算出する。				
引数名	配列	型	I/O	内容	単位
NO	—	I	I	被覆管設計引張強さ式番号 (NO ≤ 20)	—
P	20	R*8	I	被覆管設計引張強さ式の係数	—
TEMP	—	R*8	I	被覆管温度	°C

ルーチン名	FUNCTION FUNSY (NO, P, TEMP)				
Calls	なし		Called by	MAINTR, SLIMIT	
使用コモン	なし				
処理内容	温度 TEMP (°C) における被覆管の設計降伏点 FUNSY (kgf/mm ²) を算出する。				
引数名	配列	型	I/O	内容	単位
NO	—	I	I	被覆管設計降伏点式番号 (NO ≤ 20)	—
P	20	R*8	I	被覆管設計降伏点式の係数	—
TEMP	—	R*8	I	被覆管温度	°C

ルーチン名	FUNCTION FUNYNG (NO, P, TEMP)				
Calls	なし		Called by	MAINTR	
使用コモン	なし				
処理内容	温度 750 °C におけるヤング率に対する温度 T °C におけるヤング率の比 FUNYNG (—) を求める。				
引数名	配列	型	I/O	内容	単位
NO	—	I	I	被覆管設ヤング率相対値計算式番号 (NO ≤ 20)	—
P	20	R*8	I	被覆管設ヤング率相対値計算式の係数	—
TEMP	—	R*8	I	被覆管温度	°C

ルーチン名	FUNCTION GASRLS (NO, P, BURNA)				
Calls	なし		Called by	CALC	
使用コモン	なし				
処理内容	燃料ペレットからのガス放出率 GASRLS (-) を算出する。				
引数名	配列	型	I/O	内容	単位
NO	-	I	I	FPガス放出率式番号 (NO ≤ 20)	-
P	20	R*8	I	FPガス放出率式の係数	-
BURNA	-	R*8	I	炉心部平均燃焼度	MWD/MTM

ルーチン名	SUBROUTINE GETTIM (TA, T1, T2, T3, DT1, DT2, DT3, TIME, IFLAG, IT, J)				
Calls	なし		Called by	MAIN, MAINTR	
使用コモン	なし				
処理内容	周方向応力、CDF等を計算する時刻点を設定する。				
引数名	配列	型	I/O	内容	単位
TA	10	R*8	I, O	被覆管温度履歴入力時刻	day
T1	-	R*8	I, O	被覆管周方向応力、CDFの計算時刻	day
T2	-	R*8	I, O	計算結果の印刷時刻1 (基準計算、感度解析結果の印刷)	day
T3	-	R*8	I, O	計算結果の印刷時刻2 (周方向応力、CDF上限値の印刷)	day
DT1	-	R*8	I	計算時刻の刻み幅	day
DT2	-	R*8	I	計算結果の印刷時刻1の刻み幅	day
DT3	-	R*8	I	計算結果の印刷時刻2の刻み幅	day
TIME	-	R*8	O	被覆管周方向応力、CDFの計算時刻	day
IFLAG	-	I	I, O	計算結果印刷の為のコントロールフラグ	-
IT	-	I	I, O	被覆管温度履歴入力時刻の番号を表す添字	-
J	-	I	I, O	被覆管温度履歴入力時刻の番号を表す添字	-

ルーチン名	FUNCTION HCOND (NO, P, TEMP)					
Calls	なし			Called by	CALC, INIT	
使用コモン	なし					
処理内容	温度 TEMP (°C) における被覆管熱伝導度 HCOND (W/cm·°C) を算出する。					
引数名	配列	型	I/O	内容		単位
NO	-	I	I	被覆管熱伝導度式番号 (NO ≤ 20)		-
P	20	R*8	I	被覆管熱伝導度式の係数		-
TEMP	-	R*8	I	被覆管温度		°C

ルーチン名	SUBROUTINE INIT					
Calls	SETPRM, HCOND, TRNOML, CALCDF, SLIMIT			Called by	MAIN	
使用コモン	AXIAL, CLAD, EQPARA, FPGAS, FUEL, ICONST, INPTBL, MODIF, RESULT, SIGLMT, TIMDAT, TRNCAL					
処理内容	運転開始時 (時刻ゼロ) における諸量 (出力、温度、内圧、周方向応力値、等) を算出する。					
引数名	配列	型	I/O	内容		単位
なし						

ルーチン名	MAIN ROUTINE					
Calls	DTLIST, READIN, SETVAL, AXDIST, INIT, OUTPUT, GETTIM, SETEQ, CALC, MAINTR			Called by	なし	
使用コモン	AXIAL, CLAD, FPGAS, FUEL, INPTBL, MODIF, RESULT, SIGLMT, TIMDAT, TRNCAL					
処理内容	本コードのメインルーチン。時刻ゼロから寿命末期までの計算時刻を設定する都度、基準計算、感度解析を実施し、周方向応力、CDF の上限値を計算し印刷する。NOTRAN=0 の時は、過渡計算ルーチン MAINTR を call する。					
引数名	配列	型	I/O	内容		単位
なし						

ルーチン名	SUBROUTINE MAINTR				
Calls	FUNYNG, TRTRAN, FUNSY, FUNSU, GETTIM		Called by	MAIN	
使用コモン	CLAD, EQPARA, FPGAS, FUEL, MODIF, RESULT, SIGLMT, TIMDAT, TRNCAL				
処理内容	CDF 過渡計算ルーチン。MAINルーチンで設定された過渡変化想定時刻における周方向応力(上限値)と過渡履歴の被覆管温度を用いて、過渡変化に起因するCDF値を計算する。				
引数名	配列	型	I/O	内容	単位
なし					

ルーチン名	SUBROUTINE OUTPUT(IFLAG, ICOUNT, IOD)				
Calls	なし		Called by	MAIN	
使用コモン	AXIAL, CHARA, CLAD, FPGAS, FUEL, INPTBL, MODIF, RESULT, SIGLMT, TIMDAT, TRNCAL				
処理内容	基準計算、感度解析、周方向応力、CDFの上限値、等の計算結果を印刷する。				
引数名	配列	型	I/O	内容	単位
IFLAG	-	I	I	印刷する計算結果の内容を選択するフラグ	-
ICOUNT	-	I	I	印刷する時刻点の通し番号	-
IOD	-	I	I	入力時刻点を表す番号(何番目の入力時刻点か)	-

ルーチン名	SUBROUTINE READIN				
Calls	AXDIST		Called by	MAIN	
使用コモン	AXIAL, CHARA, CLAD, EQPARA, FPGAS, FUEL, ICONST, INPTBL, MODIF, RESULT, SIGLMT, TIMDAT, TRNCAL				
処理内容	カードイメージの入力データを機番1から読み込み、計算条件等の情報を印刷する。				
引数名	配列	型	I/O	内容	単位
なし					

ルーチン名	SUBROUTINE SETEQ (IC)				
Calls	SETPRM		Called by	MAIN	
使用コモン	EQPARA				
処理内容	基準計算、感度解析を行う前に call し、それぞれのケースで使用する物性式の番号、係数等をセットする。(物性式の項目は、9種類ある。)				
引数名	配列	型	I/O	内容	単位
IC	7	I	I	基準計算、各感度解析のNo.を表す添字 IC=1:基準、IC=2~7:感度解析1~6	-

ルーチン名	SUBROUTINE SETPRM (NP, VAL1, VAL2, IORD)				
Calls	なし		Called by	INIT, SETEQ	
使用コモン	EQPARA				
処理内容	物性式の係数を格納する配列変数から、実際に使用する係数を選択し、別の配列変数に格納する。				
引数名	配列	型	I/O	内容	単位
NP	-	I	I	物性式の係数の個数-2	-
VAL1	20	R*8	I	物性式の係数(下限値、ノミナル値、上限値を含めたもの)	-
VAL2	20	R*8	O	物性式の係数(下限値、ノミナル値、上限値の内1つのみ含むもの)	-
IORD	-	I	I	物性式の係数 VAL1 の内何番目の係数を選択するか	-

ルーチン名	SUBROUTINE SETVAL				
Calls	なし		Called by	MAIN	
使用コモン	AXIAL, CLAD, EQPARA, FPGAS, FUEL, INPTBL, MODIF, RESULT, SIGLMT, TRNCAL				
処理内容	基準計算、感度解析を行う前に、被覆管径、ペレット径、等の初期条件をそれぞれのケースについて設定する。				
引数名	配列	型	I/O	内容	単位
なし					

ルーチン名	SUBROUTINE SLIMIT(TMP1, TMP2)				
Calls	FUNSY, FUNSU		Called by	CALC, INIT	
使用コモン	CLAD, EQPARA, FPGAS, FUEL, MODIF, RESULT, SIGLMT, TRNCAL				
処理内容	被覆管周方向応力制限値(設計応力強さ S_m^* 、及び設計降伏点 S_y^*)算出する。 S_m^* 、及び S_y^* はそれぞれホットスポット温度ベース、ノミナル温度ベースの2種類を求める。				
引数名	配列	型	I/O	内容	単位
TMP1	2	R*8	I	その時刻までの被覆管温度最大値(ホットスポット温度及びノミナル温度)	°C
TMP2	2	R*8	I	その時刻における被覆管温度(ホットスポット温度及びノミナル温度)	°C

ルーチン名	SUBROUTINE TRNOML(NO, P, TEMP, SIGMA, TR)				
Calls	なし		Called by	CALC, CALCDF, INIT	
使用コモン	ICONST				
処理内容	通常運転時の被覆管クリープ破断時間(S_R ベース、 S_T ベース)を算出する。				
引数名	配列	型	I/O	内容	単位
NO	-	I	I	通常運転時の被覆管クリープ破断強度式番号 ($NO \leq 20$)	-
P	20	R*8	I	通常運転時の被覆管クリープ破断強度式の係数	-
TEMP	-	R*8	I	被覆管肉厚中心温度ホットスポット値	°C
SIGMA	-	R*8	I	被覆管周方向応力	kgf/mm ²
TR	2	R*8	O	被覆管クリープ破断時間(S_R ベース及び S_T ベース)	hour

ルーチン名	SUBROUTINE TRTRAN				
Calls	なし		Called by	MAINTR	
使用コモン	ICONST				
処理内容	過渡時の被覆管クリープ破断時間 (S_R ベース、 S_T ベース) を算出する。				
引数名	配列	型	I/O	内容	単位
NO	—	I	I	過渡時の被覆管クリープ破断強度式番号 ($NO \leq 20$)	—
P	20	R*8	I	過渡時の被覆管クリープ破断強度式の係数	—
TEMP	—	R*8	I	被覆管肉厚中心温度ホットスポット値	°C
YNGMOD	—	R*8	I	被覆管ヤング率相対値	—
SIGMA	—	R*8	I	被覆管周方向応力	kgf/mm ²
TR	2	R*8	O	被覆管クリープ破断時間 (S_R ベース及び S_T ベース)	hour