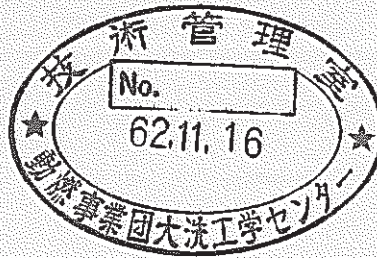


高速増殖炉システムコードSSC-Lの整備改良

反応度フィードバックモデルの組込み



1987年8月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
T	N9410 87-122
この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です	
動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室	

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

高速増殖炉システムコードSSC-Lの整備改良

反応度フィードバックモデルの組込み

大島 宏之* 山口 彰*
二ノ方 寿*

要 旨

ATWS (Anticipated Transient Without Scram) の評価では、その事象推移が極めて速いと判断されるため、炉心の核熱流動のみが解析されていた。また、解析に使用されるパラメータや仮定は保守的であり、解析結果の不確実性も一般に大きい。従って従来は考慮されていなかった反応度効果をモデル化し、炉心と熱輸送系とのカップリングを考慮した、より現実的な解析評価を行なうことが必要である。こうした解析により、ATWSの事象推移は比較的緩慢であり、ATWSに分類されているシーケンスの一部では、緩和対策を施す時間的余裕があることを示せる可能性がある。

本作業では、プラント動特性を解析するSSC-Lの投入反応度計算ルーチンの修正及び改良と反応度フィードバックモデルの追加により、ATWS事象推移の解析を可能とした。本改良によりSSC-Lでは以下の投入反応度を評価できる：(1)燃料ドップラー効果、(2)冷却材密度変化による効果、(3)燃料の熱膨張による効果、(4)構造材の熱膨張による効果、(5)炉心支持板の熱膨張による効果。適用例として、除熱系統が機能喪失する事象にスクラム失敗の重ね合わせを仮定したULOHS (Unprotected Loss of Heat Sink) の解析を行なった。本モデルを実験的に検証するとともに、実機の解析評価に適用していくことが今後の課題である。

* 大洗工学センター安全工学部原子炉工学室

August, 1987

Improvement of an Advanced System Code for Loop-Type LMFBRs, SSC-L

- Modeling of Reactivity Feedback Effects -

Hiroyuki Ohshima*, Akira Yamaguchi*

Hisasi Ninokata*

Abstract

In the safety analysis of ATWS (Anticipated Transient Without Scram) sequences, emphasis is placed on the thermo-hydraulics in reactor core and interactions between core and heat transport system (HTS) are not considered. However, if progress of the sequence is not so fast, thermohydraulics in reactor core and HTS should be calculated at the same time. A whole plant system code, such as SSC-L, is available for this purpose. Since SSC-L has not been applied to the ATWS analysis so far, reactivity feedback model in this code has something to be improved. If uncertainty in parameters used in the analysis is large, conservative assumptions are employed. Therefore, the results of simulations are conservative and have large uncertainty in general.

In order to evaluate ATWS sequences, it is desirable to take reactor core and HTS interaction into consideration and to improve accuracy of reactivity feedback model in SSC-L as well as decreasing uncertainty of the input data. Grace period available for mitigating the ATWS by the operator recovery action can be also evaluated from the whole plant thermohydraulics. Therefore, reactivity calculation module in SSC-L has been modified and improved in this study. Thus the reactivity feedback effects calculated in SSC-L are as follows:

- (1) Fuel doppler,
- (2) Sodium density and void
- (3) Fuel axial expansion,
- (4) Thermal expansion of the core internal structure, and
- (5) Thermal expansion of the core support structure.

For the purpose of checking performance of the new model, SSC-L has been applied to the simulations of ULOHS (Unprotected Loss of Heat Sink) accidents and the results are consistent in our perception. This model should be validated by experiments and SSC-L is to be extensively applied to the safety analysis of LMFBR plants in future.

*FBR Reactor Engineering Section, Safety Engineering Div.,
OEC, PNC

目 次

要 旨	I
表一覧表	IV
図一覧表	V
1. 緒 言	1
2. 反応度フィードバックモデル	3
2.1 SSC-L既存モデル	3
2.1.1 燃料ドップラー効果	3
2.1.2 冷却材密度効果	4
2.1.3 燃料膨張による密度効果	4
2.2 組み込みモデル	5
2.2.1 炉心支持板膨張効果	5
2.2.2 構造材膨張効果	7
2.2.3 燃料膨張による形状効果	8
2.3 テスト計算および検討	9
3. もんじゅULOHSプラント動特性解析	11
3.1 解析条件	11
3.2 解析結果	11
4. まとめと今後の課題	15
5. 謝 辞	16
参考文献	17
APPENDIX: 炉心支持板の膨張について	48

List of Tables

Table 2.1	Doppular Coefficient in Each Segment (Normal)	18
Table 2.2	Doppular Coefficient in Each Segment (Voided)	19
Table 2.3	Sodium Void Coefficient in Each Segment	20
Table 2.4	Fuel Density Coefficient in Each Segment ...	21
Table 2.5	Structure Density Coefficient in Each Segment	22
Table 2.6	Fuel Density Coefficient and Difference of Fuel Temperature from Steady State in Each Segment (at 50 sec.)	23
Table 2.7	Fuel Density Coefficient and Difference of Fuel Temperature from Steady State in Each Segment (at 200 sec.)	24
Table 2.8	Fuel Density Coefficient and Difference of Fuel Temperature from Steady State in Each Segment (at 500 sec.)	25
Table 2.9	Fuel Density Coefficient and Difference of Fuel Temperature from Steady State in Each Segment (at 1000 sec.)	26
Table 2.10	Fuel Density Coefficient and Difference of Fuel Temperature from Steady State in Each Segment (at 1500 sec.)	27
Table 2.11	Effects of Modification on Total Reactivities	28
Table 3.1	Analysis Conditions for ULOHS Transient	11
Table 3.2	Comparison of Reactivities (at 500 sec.) ...	29

List of Figures

Fig. 2.1 Core Channel Numbers Used in Calculations 30

Fig. 2.2 Transient Histories of Reactivities (Except the Effect of Core Supporting Structure Expansion). 31

Fig. 2.3 Effects of Axial Fuel Expansion 31

Fig. 2.4 Transient Histories of Reactivities (Except the Effect of Core Supporting Structure Expansion). 32

Fig. 2.5 Transient Histories of Reactivities 32

Fig. 2.6 Effects of Core Supporting Structure Expansion. 33

Fig. 2.7 Transient Histories of Reactivities (Before Modification) 34

Fig. 3.1 Primary Coolant Temperatures at IHX Inlets and Outlets (Case 1) 35

Fig. 3.2 Primary Coolant Temperatures at R/V Inlets and Outlets (Case 1) 35

Fig. 3.3 Relative Reactor Power (Case 1) 36

Fig. 3.4 Primary Coolant Mass Flow Rate (Case 1) 36

Fig. 3.5 Secondary Coolant Temperatures at SG Inlets and Outlets (Case 2) 37

Fig. 3.6 Secondary Coolant Temperatures at IHX Inlets and Outlets (Case 2) 37

Fig. 3.7 Primary Coolant Temperatures at IHX Inlets and Outlets (Case 2) 38

Fig. 3.8 Primary Coolant Temperatures at R/V Inlets and Outlets (Case 2) 38

Fig. 3.9 Secondary Coolant Mass Flow Rate (Case 2) 39

Fig. 3.10 Relative Reactor Power (Case 2) 39

Fig. 3.11 Transient Histories of Reactivities (Case 2) .. 40

Fig. 3.12 Secondary Coolant Mass Flow Rate (Case 3) 40

Fig. 3.13 Secondary Coolant Temperatures at SG Inlets and Outlets (Case 3) 41

Fig. 3.14	Secondary Coolant Temperatures at IHX Inlets and Outlets (Case 3)	4 1
Fig. 3.15	Primary Coolant Temperatures at IHX Inlets and Outlets (Case 3)	4 2
Fig. 3.16	Primary Coolant Temperatures at R/V Inlets and Outlets (Case 3)	4 2
Fig. 3.17	Relative Reactor Power (Case 3)	4 3
Fig. 3.18	Transient Histories of Reactivities (Case 3) ..	4 3
Fig. 3.19	Secondary Coolant Mass Flow Rate (Case 4)	4 4
Fig. 3.20	Secondary Coolant Temperatures at SG Inlets and Outlets (Case 4)	4 4
Fig. 3.21	Secondary Coolant Temperatures at IHX Inlets and Outlets (Case 4)	4 5
Fig. 3.22	Primary Coolant Temperatures at IHX Inlets and Outlets (Case 4)	4 5
Fig. 3.23	Primary Coolant Temperatures at R/V Inlets and Outlets (Case 4)	4 6
Fig. 3.24	Relative Reactor Power (Case 4)	4 6
Fig. 3.25	Transient Histories of Reactivities (Case 4) ..	4 7

1. 緒 言

高速増殖炉においては、安全保護系および原子炉停止系の多重化などに加えて、固有の負の反応度効果を積極的に活用することにより、核的炉停止機能の信頼性は一段と向上する。このような方法によって高信頼度が達成されれば、仮想的炉心崩壊事故（HCDA：Hypothetical Core Disruptive Accident）を設計基準外事象として位置づけることが可能となる。

ATWS（Anticipated Transient Without Scram）は、HCDAに至る最も重要な事象シーケンスの1つであると考えられている。ATWSの事象推移は極めて速いと判断されるため、従来はプラント動特性を考慮せずに炉心の核熱流動特性が解析されていた。また、使用されるパラメータの不確定性は一般に大きく、解析も保守的な仮定の下に行なわれている。これらの理由から解析結果の不確定性や保守性は大きいと考えられる。従って、解析精度向上のためには、使用パラメータの不確定性を可能な限り排除するとともに、従来の解析で考慮されていなかった固有の負の反応度効果をモデル化し、炉心と熱輸送系をカップリングした、より現実に即した解析評価を行なうことが必要である。

現実的なモデルに基づいた解析評価を行えば、ATWSの事象推移はこれまで想定されていた以上に緩慢であり、ATWSに分類されているシーケンスの一部では、緩和対策を施す時間的余裕があることを示せる可能性がある。このためには、全プラントシステムの挙動を解析するシステムコードを利用することが便利であるが、炉心の核熱流動のみに注目されてきたので、システムコードがATWSの解析に適用された例はほとんどない。動燃はこれまで安全工学部原子炉工学室において、ループ型FBRシステムコードとしてSSC-L^[1]（Super System Code - Loop version）の改良整備を進めてきている。SSC-Lは、高速増殖炉プラントシステムの応答を通常運転時から異常な過渡事象、さらに事故にわたるまで一貫して解析でき、しかも、汎用性が高く検証実績の多いプログラムである^{[2]-[5]}。そこで、このSSC-LをATWS事象解析に適用可能とするために、反応度計算部の修正および改良を行ない、さらに反応度フィードバックモデルの追加組込みを行なった。また、その適用例として除熱系統が機能喪失する事象に加えてスクラム失敗を仮定したいわゆるULOHS（Unprotected Loss of Heat Sink）時のプラント動特性解析を行なった。

本コードで計算可能となった投入反応度は以下の通りである。

- (1) 燃料ドップラー効果
- (2) 冷却材の密度変化による反応度効果
- (3) 燃料の熱膨張による反応度効果
- (4) 構造材の熱膨張による反応度効果
- (5) 炉心支持板の熱膨張による反応度効果

燃料と構造材の熱膨張に伴う反応度効果は、炉心構成物質の体積比変化と密度変化によるもの、お

よび炉心の形状変化によるものに分離される。今回修正および改良を行なった反応度効果は、(1)と(2)および(3)の燃料密度変化による部分であり、新たに追加されたモデルは(3)の炉心形状変化による部分と(4)、(5)の反応度効果である。本報告書では、従来のモデルおよび追加モデルの概要、試計算について述べた後、ULOHS解析ケースとそれらの結果について報告する。

2. 反応度フィードバックモデル

2.1 SSC-L 既存モデル

2.1.1 燃料のドップラー効果

ドップラー効果とは、核燃料の温度上昇にともない²³⁸U の中性子に対する共鳴吸収断面積が増加し、このため共鳴をのがれる確率が減少して反応度が小さくなる効果である。

ドップラー係数 α^{Dop} は次のように定義される。

$$\alpha^{Dop} = T \frac{dk}{dT} \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

T : 燃料温度 k : 増倍係数

上式を積分して

$$k_2 - k_1 = \alpha^{Dop} \ln T_1 / T_2 \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

ここで、反応度 ρ の定義は

$$\rho = \frac{k-1}{k} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

であるから、反応度変化 $\Delta \rho$ は

$$\Delta \rho = \rho_1 - \rho_2 = \frac{k_1 - k_2}{k_1 k_2} \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

となる。反応度変化が小さいと仮定した場合、増倍係数 k はほぼ 1 とみなせ、またこの時ドップラー効果は 10^{-4} オーダーとなるから、結局ドップラー効果による反応度変化は (2.2)、(2.4) 式より

$$\Delta \rho^{Dop} = \alpha^{Dop} \ln T_1 / T_2 \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

すなわち、ドップラー効果による局所反応度は

$$(\Delta k/k)_{ij}^{Dop} = \alpha_{ij}^{Dop} \ln T_{ij1} / T_{ij2} \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

ここで、i は炉心チャンネル番号を、j は炉心高さ方向に分割された要素番号を表す。また、 T_{ij} は分割要素 (セグメント) の体積平均温度で次式で定義される。

$$T_{ij} = \frac{\sum_k V_{ijk} T_{ijk}}{\sum_k V_{ijk}} \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

但し、kは第iチャンネルの燃料を径方向に分割した位置を表す。
 ところで、ドップラー係数 α は温度変化に対しては定数とみなせるが、燃料タイプの違いや冷却材密度変化により中性子スペクトルが異なってくるため、空間的には変動する。 α の空間分布は入力で与えられる(燃料タイプの差による影響はこれに含まれる)。冷却材の密度変化による影響は、以下に定義されるナトリウムボイド率をパラメータにして表される。

$$X_{ij}^{Na} = \frac{\rho_{ij\ ref}^{Na} - \rho_{ij}^{Na}}{\rho_{ij\ ref}^{Na}} \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

ここで ρ_{ref} はセグメントijにおける冷却材参照密度である。
 冷却材が存在する場合と存在しない場合のドップラー係数をそれぞれ β 、 γ とすると

$$\alpha_{ij}^{Dop} = \beta_{ij}^{Dop} (1 - X_{ij}^{Na}) + \gamma_{ij}^{Dop} X_{ij}^{Na} \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

となる。この α_{ij} を(2.6)式に代入し総和をとればドップラー効果による投入反応度が得られる。

2.1.2 冷却材密度効果

冷却材の温度上昇にともなって冷却材密度が減少するが、この密度減少による反応度への影響は二種類ある。1つは中性子の漏れの増加による負の反応度投入であり、もう1つは冷却材の中性子散乱マクロ断面積が減少し、スペクトルが硬化することによる正の反応度投入であるが、これらの影響は場所によって異なる。SSC-Lでは反応度係数の空間分布として入力データで与えられる。

モデル化に際しては、密度変化量を蒸発量とみなすことにより密度変化から沸騰に至るまでを同一式で扱う。すなわち、全投入反応度は次式で表される。

$$\Delta k/k^{Na} = \sum_{ij} \left(\frac{\Delta k/k}{\Delta W} \right)_{ij}^{Na} M_{ij} \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

ここで右辺括弧内は、セグメントijにおける蒸発ナトリウムの単位質量に対する反応度価値である。また、 M_{ij} はセグメントijにおける蒸発ナトリウム重量で次式で計算される。

$$M_{ij} = (\rho_{ij2}^{Na} - \rho_{ij1}^{Na}) V_{ij}^{Na} \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

2.1.3 燃料膨張による密度効果

燃料ペレットの軸方向膨張によって燃料の密度が減少するため、負の反応度が投入される。

投入反応度は冷却材密度効果と同様に次式で表わされる。

$$\Delta k/k^{AX} = \sum_{ij} \left(\frac{\Delta k/k}{\Delta W} \right)_{ij}^{Fuel} N_{ij} \dots\dots\dots (2.12)$$

ここで右辺括弧内は、セグメント ij において膨張で減少した燃料の単位質量に対する反応度価値で、入力与えられる。また、 N_{ij} は膨張で減少したセグメント内の燃料重量である。

T_{ij1} から T_{ij2} の温度上昇による軸方向膨張後の燃料高さは、線膨張係数 α_c を用いて

$$Z_{ij2} = [1 + \alpha_c (T_{ij2} - T_{ij1})] Z_{ij1} \dots\dots\dots (2.13)$$

となる。セグメント内の質量保存を考慮すると、

$$\rho_{ij1} Z_{ij1} = \rho_{ij2} Z_{ij2} \dots\dots\dots (2.14)$$

すなわち

$$\rho_{ij1} - \rho_{ij2} = \rho_{ij1} [\alpha_c (T_{ij2} - T_{ij1}) / (1 + \alpha_c (T_{ij2} - T_{ij1}))] \dots\dots\dots (2.15)$$

従って熱膨張前のセグメント体積を V_{ij1} とすると N_{ij} は

$$N_{ij} = \rho_{ij1} X_{ij} V_{ij1} \dots\dots\dots (2.16)$$

と表わされる。但し、 X_{ij} は

$$X_{ij} = \alpha_c (T_{ij2} - T_{ij1}) / [1 + \alpha_c (T_{ij2} - T_{ij1})] \dots\dots\dots (2.17)$$

で定義される。

2.2 組み込みモデル

2.2.1 炉心支持板膨張効果

冷却材温度の上昇にともなって炉心支持板が膨張、集合体間隔が径方向に広がることにより生ずる反応度効果であり、以下に示す3つの効果がある。但し、ここでは炉心支持板以外の構造材の膨張は考慮しない。

<冷却材流入増加による効果>

支持板膨張による炉心体積増加分ナトリウムが流入するが、これは冷却材の密度が増加する効果とみなせる。

増加体積 ΔV は

$$\begin{aligned} \Delta V &= \{ (1 + \alpha_s \Delta T)^2 - 1 \} V_0 \\ &= 2 \alpha_s \Delta T V_0 \end{aligned} \dots\dots\dots (2.18)$$

α_s : 構造材線膨張率

従って、反応度の温度係数は次のようになる。

$$\frac{\Delta k/k}{\Delta T} = \frac{2 \alpha_s}{F_{Na}} \left(\frac{\Delta k/k}{\Delta \rho/\rho} \right)_{Na} \dots\dots\dots (2.19)$$

但し、 F_{Na} はナトリウム体積分率で、右辺括弧はナトリウム密度係数である。

<炉心半径・径方向ブランケット内外径増加による効果>

炉心体積の増加によって中性子の漏洩が減少するため、正の反応度が投入される。投入反応度は径方向形状係数を用いて次のように表される。

$$\frac{\Delta k/k}{\Delta T} = \alpha_s \left(\frac{\Delta k/k}{\Delta R/R} \right) \dots\dots\dots (2.20)$$

R : 炉心半径

<燃料・構造材密度減少効果>

支持板膨張によって集合体ピッチが増加するが、これは燃料や構造材の密度を減少させる効果となる。この効果は燃料密度係数と構造材密度係数を用いて次のように表される。

$$\frac{\Delta k/k}{\Delta T} = -2 \alpha_s \left[\left(\frac{\Delta k/k}{\Delta R/R} \right)_{Fuel} + \left(\frac{\Delta k/k}{\Delta \rho/\rho} \right)_{Structure} \right] \dots\dots\dots (2.21)$$

以上3つの効果により支持板膨張による投入反応度は次のようになる。

$$\frac{\Delta k/k}{\Delta T} = \Sigma \alpha_s \left[\frac{2}{F_{Na}} \left(\frac{\Delta k/k}{\Delta \rho/\rho} \right)_{Na} + \left(\frac{\Delta k/k}{\Delta R/R} \right) - 2 \left\{ \left(\frac{\Delta k/k}{\Delta \rho/\rho} \right)_{Fuel} + \left(\frac{\Delta k/k}{\Delta \rho/\rho} \right)_{Str} \right\} \right] \dots\dots\dots (2.22)$$

$$\Delta k/k = \left[-\Sigma_{ij} \left(\frac{2 \alpha_s}{F_{Na}} \right)_{ij} \left(\frac{\Delta k/k}{\Delta W} \right)_{ij} \rho_{ij}^{Na} V_{ij}^{Na} + \alpha_s \left(\frac{\Delta k/k}{\Delta R/R} \right) + 2 \alpha_s \left\{ \Sigma_{ij} \left(\frac{\Delta k/k}{\Delta W} \right)_{ij}^{Fuel} + \rho_{ij}^{Fuel} V_{ij}^{Fuel} + \Sigma_{ij} \left(\frac{\Delta k/k}{\Delta W} \right)_{ij}^{Str} \rho_{ij}^{Str} V_{ij}^{Str} \right\} \right] \Delta T_{inlet} \dots\dots\dots (2.23)$$

但し、支持板の膨張は炉容器に拘束されるため、実際の解析では膨張量に対して何らかのFactorを考慮する必要がある。(APPENDIX参照)

2.2.2 構造材膨張効果

<被覆管膨張効果>

軸方向膨張によって炉心内の構造材密度が減少する。これによる反応度効果は構造材密度係数を用いて次のように表される。

$$\frac{\Delta k/k}{\Delta T} = -\alpha_s \frac{F_{clad}}{F_t} \left(\frac{\Delta k/k}{\Delta \rho/\rho} \right)_s \dots\dots\dots (2.24)$$

α_s : 構造材線膨張係数 F_{clad} : 被覆管体積分率 F_t : 全構造材体積分率

ここで、全構造材体積分率は集合体の全体積に対する全構造材体積の比であり、被覆管、ラッパー管、スペーサーワイヤーそれぞれの体積分率の和で与えられる。

$$F_{clad} = \pi (R_{out}^2 - R_{in}^2) H \times (\text{ピン本数}) / V_0 \dots\dots\dots (2.25)$$

$$F_{wrapper} = 2\sqrt{3} (D_H + \Delta D_H) \Delta D_H H \times (\text{アセンブリ本数}) / V_0 \dots\dots (2.26)$$

$$F_{spacer} = \pi r_s^2 H \sqrt{1 + \frac{4\pi^2 (R_{out} + r_s)^2}{P_i^2}} \times (\text{ピン本数}) / V_0 \dots\dots (2.27)$$

R_{in} : 被覆管内半径 R_{out} : 被覆管外半径 r_s : ワイヤー半径

H : 代表高さ P_i : ワイヤーピッチ

また、被覆管径方向の膨張は冷却材体積比を減少、従って冷却材密度を減少させる。よってナトリウム密度係数を用いれば投入反応度は、

$$\frac{\Delta k/k}{\Delta T} = -2\alpha_s \frac{F_{pin}}{F_{Na}} \left(\frac{\Delta k/k}{\Delta \rho/\rho} \right)_{Na} \dots\dots\dots (2.28)$$

となる。

<ラッパー管膨張効果>

被覆管軸方向膨張と同様の考え方により、ラッパー管膨張による投入反応度は構造材密度係数を用いて、

$$\frac{\Delta k/k}{\Delta T} = -\alpha_s \frac{F_{wrp}}{F_t} \left(\frac{\Delta k/k}{\Delta \rho/\rho} \right)_{str} \dots\dots\dots (2.29)$$

となる。径方向膨張の効果はラッパー管内外で相殺とする。

以上2つの効果により、構造材膨張による投入反応度は次のようになる。

$$\frac{\Delta k/k}{\Delta T} = \Sigma \left\{ -\alpha_s \frac{F_{clad}}{F_t} \left(\frac{\Delta k/k}{\Delta \rho/\rho} \right)_{Str} - 2 \alpha_s \frac{F_{pin}}{F_{Na}} \left(\frac{\Delta k/k}{\Delta \rho/\rho} \right)_{Na} - \alpha_s \frac{F_{wrp}}{F_t} \left(\frac{\Delta k/k}{\Delta \rho/\rho} \right)_{Str} \right\} \dots\dots\dots (2.30)$$

$$\begin{aligned} \Delta k/k = & \Sigma_{ij} \alpha_{s\ ij} \left(\frac{F_{clad}}{F_t} \right)_{ij} \left(\frac{\Delta k/k}{\Delta w} \right)_{ij}^{str} \rho_{ij}^{clad} V_{ij}^{clad} \Delta T_{ij}^{clad} \\ & + \Sigma_{ij} \alpha_{s\ ij} \left(\frac{F_{wrp}}{F_t} \right)_{ij} \left(\frac{\Delta k/k}{\Delta w} \right)_{ij}^{str} \rho_{ij}^{wrp} V_{ij}^{wrp} \Delta T_{ij}^{wrp} \\ & + \Sigma_{ij} \alpha_{s\ ij} \left(\frac{F_{pin}}{F_{Na}} \right)_{ij} \left(\frac{\Delta k/k}{\Delta w} \right)_{ij}^{Na} \rho_{ij}^{Na} V_{ij}^{Na} \Delta T_{ij}^{Na} \dots (2.31) \end{aligned}$$

2.2.3 燃料膨張による形状効果

上記のラッパー管同様，径方向の膨張は均質組成に影響を与えないため反応度の変化はないものとし，軸方向のみの効果を考慮する。燃料の軸方向膨張による反応度効果は 2.1.3 で示した燃料密度が減少する効果と，燃料体積が増加することにより中性子の漏洩が減少する効果がある。ここでは後者を扱う。

<軸方向膨張による中性子漏洩の減少>

中性子漏洩減少効果による投入反応度は，軸方向形状係数を用いて

$$\frac{\Delta k/k}{\Delta T} = -\alpha_c(T) \left(\frac{\Delta k/k}{\Delta H/H} \right) \dots\dots\dots (2.32)$$

となる。ΔH/Hは炉心の軸方向膨張比率であるが，これは各チャンネル毎に熱膨張量を計算し算術平均で評価する。

密度効果と合わせると燃料軸方向膨張による投入反応度は，

$$\frac{\Delta k/k}{\Delta T} = \Sigma -\alpha_c(T) \left(\frac{\Delta k/k}{\Delta \rho/\rho} \right)_{Fuel} + \alpha_c(T) \left(\frac{\Delta k/k}{\Delta H/H} \right) \dots\dots (2.33)$$

$$\begin{aligned} \Delta k/k = & \Sigma_{ij} \alpha_{c\ ij} (T_{Fuel}) \left(\frac{F_{clad}}{F_t} \right)_{ij} \left(\frac{\Delta k/k}{\Delta w} \right)_{ij}^{str} \rho_{ij}^{clad} V_{ij}^{clad} \Delta T_{ij}^{clad} \\ & + \left(\frac{\Delta H}{H} \right)_{average} \left(\frac{\Delta k/k}{\Delta H/H} \right) \dots\dots\dots (2.34) \end{aligned}$$

2.3 テスト計算および検討

以下の解析条件でULOHsを想定し計算を行なった。

解析条件： $t = 0$ (sec)で全ループIHX熱交換停止

スクラム失敗

主ポンプのトリップ・配管の放熱なし

なお、Fig. 2.1に示すように炉心を14 ch.で近似する。炉心は平衡末期炉心とし、ドップラー、冷却材密度 (liquid, voided)、燃料密度、構造材密度の各反応度係数の空間分布をそれぞれTable 2.1～Table 2.5に示す。これらの反応度係数は、文献[6],[7]のデータをもとにスプライン補間^[8]によって作成したものである。

まず、炉心支持板膨張の効果を除いて計算を行なった。 $t = 500$ (sec)までの各投入反応度の変化をFig. 2.2に示す。燃料膨張による反応度効果が約80秒の時点で正に転じ、それ以後冷却材密度効果と同程度まで上昇する。これはFig. 2.3に示されるように、燃料膨張による形状効果が正に大きく投入されたことによるものである。各チャンネルの複雑な伸縮および反応度値の変化は、炉心全体を単純な円柱とした近似では代表できず、形状係数を各チャンネル毎に算出するなどの対策が必要である。ここでは以後の計算に、燃料膨張による形状効果を密度効果の(-0.5)倍と仮定して行うことにする。この仮定を用いた計算結果をFig. 2.4に示す。

次に炉心支持板膨張効果を入れた計算での各投入反応度の変化をFig. 2.5に示す。但し、熱膨張量に対するFactorとして0.5を採用している(付録参照)。時間の経過とともに徐々に支持板膨張による負の反応度が投入されていくのがわかる。また、Fig. 2.6に支持板膨張による投入反応度を構成している各効果の変化を示す。燃料密度変化の効果が負に、それ以外は正に投入されている。本モデルは水平方向の膨張のみを考慮しているため、その仮定が成立しなくなる温度領域では拘束条件の変化・たわみの発生等により、炉心支持板膨張による投入反応度の精度が悪化するものと思われる。従ってFEM等を用いて炉心支持板の変形を求めることより、仮定の適用範囲を把握しておく必要がある。

Fig. 2.4およびFig. 2.5を比較すると、炉心支持板膨張効果の導入により燃料膨張効果による投入反応度が、約250秒以後正に転じていることがわかる。燃料密度係数の空間分布は、Table 2.1, Table 2.4に示されるように、ドップラー係数のそれよりもはるかに反応度値が燃料領域の中心部に集中しているため、燃料密度効果は炉心中心付近の燃料温度に大きく左右されることになる。支持板膨張効果の導入により、炉心中心付近の温度低下が多少速くなったため、このような正への転換が生じたものと思われる(これに対しドップラー効果による投入反応度は、ブランケット部の寄与が比較的大きいため、燃料領域中心部の正の反応度と相殺し全体で負になり得る)。参考にIHXにおいて熱交換停止後の燃料温度変化の概略をTable 2.6～Table 2.10に示す、

Fig. 2.7に反応度モデル追加前のSSC-Lで計算した投入反応度変化を示す。また、

Table 1.11に $t = 500$ (sec) における投入反応度の比較を示す。モデルの追加による他の投入反応度への影響は、速効性のドップラー効果に対するものが最も顕著で、新たに追加された効果を打ち消すように作用する。従って全投入反応度に関しては大きな差は見られず、支持板膨張効果を入れても0.4程度の差が生じるに過ぎない。

3. もんじゅULOHSプラント動特性解析

3.1 解析条件

2章に述べた反応度フィードバックモデルの適用を、原型炉もんじゅの体系に対して試みた。ここでは、2次系の状態が投入反応度や1次系冷却材温度にどの程度影響するか比較を行なう。IHXから2次系への熱交換停止、及び蒸気発生機から水蒸気系への熱交換停止の2つの事象を想定する。全ケースともスクラムと1次系のポンプトリップは行なわれないものとする。以下に解析条件を示す。

Table 3.1 解析条件

CASE	断熱位置	ループ数	時刻(S)	1次系流量	2次系流量
1	IHX	全ループ	0	定格	—
2	SG	全ループ	40	定格	定格
3	SG	全ループ	40	定格	ポニーモータ 強制循環
4	SG	全ループ	40	定格	自然循環

3.2 解析結果

<CASE-1>

この事象想定では、全ループで2次系への除熱が行なわれないと仮定しているため、もっとも保守的なケースであると考えられる。Fig. 3.1に1次系冷却材IHX出入口温度変化を、Fig. 3.2に炉容器出入口温度を示す。熱交換停止後IHX出口温度は急激に上昇し(最大温度上昇率は $11.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{sec}$)、約35秒で定常時のホットレグ側温度に達する。炉容器入口温度はこれに約15秒遅れて上昇を始め $t=40$ (sec)までに約 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上昇する。このとき最大温度上昇率は $8.6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ となる。炉容器出口温度は $t=25$ (sec)から上昇を始め $t=70$ (sec)で上昇率 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ ピークを迎えた後、上昇速度を鈍らせながら上がり続ける。この温度上昇に追随して、冷却材循環順に他の3つの温度も上昇していく。約186秒で炉容器出口温度は冷却材バウンダリの健全性喪失判断基準温度 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ に到達する。

Fig. 3.3に全炉心出力の変化を、Fig. 3.4に1次系流量の変化を示す。投入反応度の動きに対応して出力は低下し、 $t=500$ (sec)で定格の42%となる(投入反応度の変化は前節のFig. 2.5に示される)。また、流量は温度上昇による密度変化のため減少する。

<CASE-2>

2次系で定格流量が維持されていると仮定することにより、2次系のナトリウム熱容量に事象推移の緩和を期待するものである。Fig. 3.5に2次系冷却材SG出入口温度変化、Fig. 3.6に2次冷却材IHX出入口温度変化、そしてFig. 3.7に1次系冷却材IHX出入口温度変化を示す。SGでの熱交換停止後約85秒で、SG出口温度は定常時の入口温度に達する。これに続いて2次系IHX入口温度は約40秒後に、1次系IHX出口温度は約60秒後に上昇を始める（IHX出口と炉容器入口間の温度上昇時間遅れは<CASE-1>と同様）。

Fig. 3.8に炉容器出入口冷却材温度変化を示す。SG出口での最大温度上昇率が $4.7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ であるのに対し、IHXプレナムの存在等により炉容器入口では $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ までに緩和されている。また、炉容器出口温度は熱交換停止後約90秒で上昇を開始、 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ 程度で上昇を続け約350秒で $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ に達する。

Fig. 3.9に2次系冷却材流量の変化を示す。温度上昇に伴う密度変化により多少流量が低下していく。

Fig. 3.10に全炉心出力の変化を、Fig. 3.11に投入反応度の変化を示す。また、 $t = 500$ (sec)での各投入反応度は次のようになる。

$$\text{TOTAL} = -1.3\% : \text{ドップラー} = -4.9\% : \text{Naボイド} = 3.1\%$$

$$\text{燃料膨張} = 0.7\% : \text{構造材膨張} = 1.6\% : \text{支持板膨張} = -1.8\%$$

<CASE-1>に比較して炉内冷却材温度上昇が緩やかなため、反応度の変動も小さくなる。従って出力の低下も遅く、 $t = 500$ (sec)で定格出力の66%となる。

<CASE-3>

Fig. 3.12に2次系冷却材流量を示す。SG熱交換停止後約10秒遅れで2次系SG出口温度高の信号を拾い、2次系主ポンプが停止しポンモーターが起動する。実機プラントでは2次系はこの状態になると考えられる。定格の10%の流量となるが、冷却材の温度上昇に伴う自然循環力の増大により、僅かながら流量は増加していく。

Fig. 3.13に2次系冷却材SG出入口温度変化を、Fig. 3.14に2次系冷却材IHX出入口温度変化を示す。<CASE-2>とは異なり、主ポンプトリップによる流量の急激な低下により、SG出口温度は熱交換停止後約20秒程度で上昇速度が鈍ってしまう。SG入口温度も $t = 400$ (sec)まではほとんど変化がない。IHX側では、やはり流量低下により熱交換停止の影響の伝播が遅れるため、 $t = 200$ (sec)あたりから入口温度が徐々に上がり始める。一方出口温度は1次系からの熱輸送により上昇を始め、熱交換停止後約380秒で $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ に達する。

Fig. 3.15, Fig. 3.16に1次系冷却材IHX出入口温度及び炉容器出入口温度変化を示す。IHX出口温度は<CASE-2>のような時間遅れはほとんどなく、2次系主

ポンプのトリップとはほぼ同時に上昇を始める。＜CASE-2＞というよりむしろ傾向は＜CASE-1＞に近く、SGでの熱交換停止の影響より流量低下による1次系から2次系への熱伝達劣化の影響が強いことがわかる。このときの最大温度上昇率は $5.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ となる。炉容器出口温度はSG熱交換停止後約50秒で上昇を開始し、236秒で $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ に到達する。

Fig. 3.17に全炉心出力の変化を、Fig. 3.18に投入反応度の変化を示す。また、 $t = 500\text{ (sec)}$ での各投入反応度は次のようになる。

$$\text{TOTAL} = -1.4\text{ }^{\circ} : \text{ドップラー} = -5.6\text{ }^{\circ} : \text{Naボイド} = 4.0\text{ }^{\circ}$$

$$\text{燃料膨張} = 1.0\text{ }^{\circ} : \text{構造材膨張} = 2.0\text{ }^{\circ} : \text{支持板膨張} = -2.8\text{ }^{\circ}$$

各投入反応度の動きは時間遅れを除けば＜CASE-1＞に近い傾向を示す。冷却材温度変化率に各反応度とも敏感であるが（特にドップラー、Naボイド）、正・負それぞれの変動量が打ち消しあってtotal値では大きな差は生じない。炉心出力は、 $t = 500\text{ (sec)}$ で定格出力の56%となる。

＜CASE-4＞

Fig. 3.19は2次系冷却材流量の変化を示す。2次系主ポンプトリップ後約80秒で定格の6%まで流量は低下するが（ボニーモーターは起動しない）、その後冷却材温度上昇による自然循環力の増大に伴って徐々に増加し、 $t = 500\text{ (sec)}$ では8%となる。

Fig. 3.20に2次系冷却材SG出入口温度変化を、Fig. 3.21に2次系冷却材IHX出入口温度変化を示す。＜CASE-3＞に比べ、SG出口温度の上昇はさらに緩慢となり、また、SG入口温度及びIHX入口温度は、 $t = 500\text{ (sec)}$ までほとんど変化しなくなる。

Fig. 3.22, Fig. 3.23に1次系冷却材IHX出入口温度及び炉容器出入口温度変化を示す。 $t = 130\text{ (sec)}$ あたりまでは＜CASE-3＞とほとんど同じであるが、それ以降は多少上昇率が大きくなり、218秒で $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ に到達する。

Fig. 3.24に全炉心出力の変化を、Fig. 3.25に投入反応度の変化を示す。また、 $t = 500\text{ (sec)}$ での各投入反応度は次のようになる。

$$\text{TOTAL} = -1.5\text{ }^{\circ} : \text{ドップラー} = -6.0\text{ }^{\circ} : \text{Naボイド} = 4.3\text{ }^{\circ}$$

$$\text{燃料膨張} = 1.0\text{ }^{\circ} : \text{構造材膨張} = 2.2\text{ }^{\circ} : \text{支持板膨張} = -3.0\text{ }^{\circ}$$

これは、温度履歴同様＜CASE-3＞とほぼ同じ傾向となっている。炉心出力は、 $t = 500\text{ (sec)}$ で定格出力の53%となる。

以上4ケースの結果をTable 3.2にまとめる。各ケースの中で最も冷却材の温度上昇が速いのは全IHXで熱交換を停止した場合である。一方、最も緩慢であったのは全SGで熱交換停止後も2次系冷却材流量が十分確保される場合で、バウンダリ健全性が保証される限界温度を $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ と仮定したとき、冷却材温度がそれに到達するまで5分以上の時間裕度があったのは、このケー

スのみである。しかし、これらの解析ケースの設定は保守側のものであるので、さらに除熱機能喪失のループ数等をパラメータとしたり、水蒸気系の熱容量など実際に期待できる除熱源を考慮するなどしてプラント応答解析を実施した後、ULOHSの評価を行なうことが必要である。

解析を通してULOHSの初期過程の事象推移は、まず、除熱源喪失による冷却材の温度上昇にともなってドップラー効果が最も優勢となり、炉心全体で負の反応度が投入される。このため出力が低下し相対的に高温部であった炉心中心付近の温度は低下するが、周辺燃料及びブランケット部の温度はバルク温度上昇の影響で上昇する。従って、炉容器内の冷却材は径方向温度分布の平坦化を進めながら上昇していくものと考えられる。しかし、ULOHSの事象推移には、ポンプスティックなどの動的機器機能喪失条件や、バウンダリの健全性限界などの静的機器破損条件などの不確定要因が多い。そのため、イベントツリー、フォールトツリーを作成し事象推移を評価する場合には、これらの不確定要因を十分検討することが必要である。

4. まとめと今後の課題

A T W S 解析精度向上のため、ループ型 F B R システムコード S S C - L における反応度計算ルーチンの修正および改良を行ない、さらに新たに反応度フィードバックモデルを組込んだ。追加されたモデルは以下の通りである。

- 燃料軸方向膨張による形状効果
- 構造材膨張効果
 - 被覆管軸方向膨張による構造材密度減少効果
 - 被覆管径方向膨張による冷却材密度減少効果
 - ラッパー管軸方向膨張による構造材密度減少効果
- 炉心支持板膨張効果
 - 炉心内冷却材増加による冷却材密度効果
 - 炉心体積増加による形状効果
 - 炉心体積増加による燃料密度減少効果
 - 炉心体積増加による構造材密度減少効果

また、もんじゅ U L O H S 時のプラント応答解析に、反応度フィードバックモデルを整備した S S C - L の適用を試み、妥当な解が得られることを確認した。解析は 2 次系の状態をパラメータとして、4 つのケースを設定して行った。その結果、最も冷却材の温度上昇が速いのは全 I H X で熱交換を停止した場合で、バウンダリの健全性が保証される温度を 6 5 0 ° C と仮定したとき、1 8 6 秒で炉心出口温度がそれに到達した。このとき温度上昇率は炉心入口で最大 8.6 ° C / sec であった。一方、2 次系で定格流量が維持されているならば、冷却材温度が 6 5 0 ° C に達するまでに 5 分以上を要することがわかった。いずれの場合にも、U L O H S の発生後、バウンダリ破損などの新しい局面に進展するには、数分以上の時間的余裕があることが示された。

本研究で改良した反応度フィードバックモデルを、もんじゅや実証炉などの解析評価に適用していくことが今後の課題である。また、実験炉における A T W S 試験や、P L A N D T L 施設などで予定されている反応度効果を同定する試験解析を行ないコードを検証していくとともに、入力パラメータやモデルの不確定幅を低減することが必要である。

5. 謝 辞

本研究を実施するに当たって、安全工学部炉心安全工学室野中信之副主任研究員には、入力データ作成の際に有益なる助言，協力を頂きました。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) J. G. Guppy, "Super System Code [SSC Rev. 2], An Advanced Thermohydraulic Simulation Code for Transients in LMFBRs", BNL-NUREG-51650, Apr. 1983.
- (2) Yoshikawa, S., et al, "An Integrated Analysis of Natural Circulation Test in JOYO Using SSC-L and COMMIX-1A", Proc. of Int. Topical Mtng. on Fast Reactor Safety, Knoxville, Apr. (1985)
- (3) W. C. Horak, et al., "Validation of SSC Using the FFTF Natural Circulation Test", BNL-NUREG-31437, Dec. (1982)
- (4) W. C. Horak, et al., "Long-Term Post-Test Simulation of the FFTF Natural Circulation Tests Using SSC", Trans. Am. Nucl. Soc. 46, pp798(1984)
- (5) B. Schubert, "Analysis of Decay Heat Removal in KNK II", Proc. of the Second Specialists' Mtng. on Decay Heat Removal and Natural Convection in LMFBRs, New York, Apr. (1985).
- (6) 手塚他, 「高速増殖炉「もんじゅ」配管破損事故の解析評価」, PNC ZJ201 80-49, Jun. (1980)
- (7) 関他, 「三次元反応度係数分布」, PNC SJ206 76-27, Nov. (1976)
- (8) Naoei Suda, et al., "SPRINT User's Manual (Spline-Interpolation Routine to Produce SAS Material Worths with Plots and Graphs)", PNC SN941-82-73, Feb. 1982.

Table 2.1 ドップラー係数 (Normal) $\times 10^{-5} \Delta K/K$

上 ブランケット 部	- 0.476	- 0.295	- 0.517	- 0.422	- 0.429	- 0.468	-0.147	-0.192	- 0.369	-0.177	-0.073
	- 4.423	- 2.705	- 4.730	- 3.831	- 3.882	- 4.107	-1.231	-1.631	- 1.577	-0.634	-0.229
炉 心	-10.330	- 6.024	-10.579	- 8.908	- 9.025	- 8.474	-2.528	-3.436	- 5.986	-2.127	-0.687
	-17.873	-10.319	-18.763	-16.073	-16.356	-14.816	-4.403	-6.013	-10.631	-3.727	-1.181
	-22.469	-12.893	-23.855	-20.550	-21.028	-18.973	-5.629	-7.702	-14.884	-5.199	-1.633
	-22.469	-12.857	-23.892	-20.600	-21.100	-19.035	-5.642	-7.715	-15.248	-5.317	-1.664
	-18.216	-10.461	-19.359	-16.630	-16.944	-15.226	-4.484	-6.116	-11.617	-4.049	-1.278
	-11.675	- 6.757	-12.382	-10.542	-10.596	- 9.476	-2.719	-3.683	- 6.982	-2.438	-0.784
下 ブランケット 部	- 7.337	- 4.347	- 7.731	- 6.424	- 6.174	- 5.854	-1.537	-2.037	- 2.239	-0.861	-0.303
	- 1.069	- 0.645	- 1.124	- 0.910	- 0.823	- 0.704	-0.173	-0.226	- 0.504	-0.218	-0.084
	ch. 1	ch. 2	ch. 3	ch. 4	ch. 5	ch. 6	ch. 7	ch. 8	ch. 9	ch. 10	ch. 11

Table 2.2 ドップラー係数 (Voided) $\times 10^{-5} 4K/K$

上 ブラン ケット 部	- 0.442	-0.271	- 0.476	- 0.391	- 0.401	- 0.444	-0.145	-0.191	- 0.450	-0.229	-0.094
	- 3.687	-2.245	- 3.921	- 3.175	- 3.213	- 3.425	-1.063	-1.422	- 1.811	-0.780	-0.291
炉 心	- 7.720	-4.504	- 7.865	- 6.586	- 6.620	- 6.076	-1.872	-2.567	- 6.451	-2.481	-0.827
	-13.059	-7.550	-13.621	-11.588	-11.660	-10.296	-3.155	-4.347	-11.096	-4.232	-1.386
	-16.309	-9.382	-17.202	-14.710	-14.865	-13.064	-3.994	-5.511	-15.266	-5.800	-1.890
	-16.363	-9.392	-17.287	-14.793	-14.960	-13.143	-4.015	-5.537	-15.676	-5.950	-1.933
	-13.452	-7.745	-14.204	-12.117	-12.200	-10.674	-3.241	-4.460	-12.269	-4.619	-1.504
	- 8.920	-5.169	- 9.401	- 7.960	- 7.928	- 6.918	-2.045	-2.797	- 7.726	-2.868	-0.934
下 ブラン ケット 部	- 6.256	-3.695	- 6.546	- 5.425	- 5.199	- 4.973	-1.355	-1.813	- 2.669	-1.055	-0.376
	- 1.003	-0.602	- 1.049	- 0.850	- 0.775	- 0.681	-0.176	-0.232	- 0.610	-0.267	-0.109
	ch. 1	ch. 2	ch. 3	ch. 4	ch. 5	ch. 6	ch. 7	ch. 8	ch. 9	ch. 10	ch. 11

Table 2.3 ナトリウム・ボイド係数 $\times 10^{-5} \Delta K/K/KG-Na$

上 ブランケット 部	-0.570	-0.531	-0.467	-0.385	-0.306	-0.228	-0.161	-0.130	-0.037	-0.011	-0.003
	-1.413	-1.264	-1.129	-1.019	-0.884	-0.796	-0.616	-0.522	-0.162	-0.044	-0.011
炉 心	-0.844	-0.709	-0.884	-0.901	-0.899	-1.278	-1.679	-1.542	-0.652	-0.155	-0.037
	4.010	3.737	3.061	2.350	1.680	0.322	-1.493	-1.583	-1.059	-0.261	-0.062
	7.263	6.767	5.721	4.574	3.431	1.372	-1.331	-1.578	-1.395	-0.350	-0.084
	7.435	6.939	5.866	4.690	3.509	1.423	-1.308	-1.559	-1.427	-0.358	-0.086
	4.533	4.263	3.517	2.715	1.931	0.460	-1.443	-1.549	-1.150	-0.283	-0.067
	-0.019	0.081	-0.144	-0.354	-0.561	-1.102	-1.643	-1.517	-0.747	-0.176	-0.041
下 ブランケット 部	-0.723	-0.694	-0.661	-0.629	-0.659	-0.650	-0.522	-0.446	-0.175	-0.048	-0.012
	-0.462	-0.429	-0.380	-0.318	-0.262	-0.184	-0.117	-0.095	-0.033	-0.010	-0.003
	ch.1	ch.2	ch.3	ch.4	ch.5	ch.6	ch.7	ch.8	ch.9	ch.10	ch.11

Table 2.4 燃料密度係数 $\times 10^{-5} \Delta K/K/KG-MO_2$

上 ブラン ケット 部	- 0.177	-0.168	-0.146	-0.120	-0.095	-0.069	-0.049	-0.039	-0.003	-0.001	-0.0003
	- 0.287	-0.288	-0.235	-0.225	-0.193	-0.182	-0.146	-0.125	-0.013	-0.004	-0.001
炉 心	- 6.361	-5.490	-5.091	-4.399	-3.657	-3.853	-2.888	-2.404	-0.044	-0.012	-0.003
	- 9.373	-7.897	-7.529	-6.594	-5.583	-6.167	-4.797	-4.038	-0.069	-0.020	-0.005
	-11.135	-9.177	-8.902	-7.817	-6.683	-7.543	-5.937	-5.025	-0.089	-0.027	-0.007
	-11.007	-9.009	-8.793	-7.728	-6.618	-7.476	-5.912	-4.998	-0.091	-0.028	-0.007
	- 9.185	-7.612	-7.347	-6.434	-5.479	-6.129	-4.775	-4.024	-0.075	-0.022	-0.005
	- 6.312	-5.376	-5.069	-4.408	-3.702	-3.937	-2.957	-2.462	-0.051	-0.014	-0.003
下 ブラン ケット 部	- 0.182	-0.249	-0.189	-0.184	-0.196	-0.198	-0.170	-0.144	-0.014	-0.004	-0.001
	- 0.116	-0.113	-0.098	-0.083	-0.071	-0.050	-0.033	-0.027	-0.003	-0.001	-0.0002
	ch.1	ch.2	ch.3	ch.4	ch.5	ch.6	ch.7	ch.8	ch.9	ch.10	ch.11

Table 2.5 構造材密度係数 $\times 10^{-5}$ K/K/KG-STEEL

上 ブランケット 部	-0.024	-0.224	-0.197	-0.163	-0.129	-0.095	-0.068	-0.054	-0.019	-0.006	-0.001
	-0.623	-0.550	-0.491	-0.444	-0.377	-0.329	-0.253	-0.215	-0.074	-0.022	-0.006
炉 心	+0.193	+0.173	+0.048	-0.011	-0.052	-0.246	-0.489	-0.465	-0.260	-0.071	-0.017
	+2.539	+2.284	+1.957	+1.594	+1.250	+0.599	-0.271	-0.360	-0.403	-0.119	-0.029
	+4.012	+3.626	+3.164	+2.618	+2.078	+1.115	-0.137	-0.296	-0.521	-0.159	-0.039
	+4.059	+3.671	+3.205	+2.652	+2.101	+1.127	-0.131	-0.292	-0.533	-0.162	-0.040
	+2.722	+2.464	+2.128	+1.733	+1.348	+0.649	-0.254	-0.347	-0.437	-0.129	-0.032
	+0.559	+0.516	+0.395	+0.258	+0.124	-0.159	-0.466	-0.448	-0.297	-0.081	-0.020
下 ブランケット 部	-0.301	-0.283	-0.271	-0.256	-0.268	-0.264	-0.215	-0.184	-0.080	-0.024	-0.006
	-0.197	-0.182	-0.161	-0.135	-0.111	-0.078	-0.050	-0.040	-0.017	-0.005	-0.001
	ch.1	ch.2	ch.3	ch.4	ch.5	ch.6	ch.7	ch.8	ch.9	ch.10	ch.11

Table 2.6 燃料密度係数および温度変化

t = 5 0 sec

温度変化	℃
係数	$\times 10^{-5}$

上 ブ ラ ン ケ ッ ト 部	-0.177	-0.168	-0.146	-0.120	-0.095	-0.069	-0.049	-0.039	-0.003	-0.001	-0.0003
	-0.287	-0.288	-0.235	-0.225	-0.193	-0.182	-0.146	-0.125	-0.013	-0.004	-0.001
炉 心	-6.361	-5.490	-5.091	-4.399	-3.657	-3.853	-2.888	-2.404	-0.044	-0.012	-0.003
	-9.373	-7.897	-7.529	-6.594	-5.583	-6.167	-4.797	-4.038	-0.069	-0.020	-0.005
	-6 -11.135	-3 -9.177	-8.902	-7.817	-6.683	-7.543	-5.937	-5.025	-0.089	-0.027	-0.007
	-2 -11.007	-3 -9.009	-8.793	-7.728	-6.618	-7.476	-5.912	-4.998	-0.091	-0.028	-0.007
	-9.185	-7.612	-7.347	-6.434	-5.479	-6.129	-4.775	-4.024	-0.075	-0.022	-0.005
	-6.312	-5.376	-5.069	-4.408	-3.702	-3.937	-2.957	-2.462	-0.051	-0.014	-0.003
下 ブ ラ ン ケ ッ ト 部	-0.182	-0.249	-0.189	-0.184	-0.196	-0.198	-0.170	-0.144	-0.014	-0.004	-0.001
	-0.116	-0.113	-0.098	-0.083	-0.071	-0.050	-0.033	-0.027	-0.003	-0.001	-0.0002
	ch. 1	ch. 2	ch. 3	ch. 4	ch. 5	ch. 6	ch. 7	ch. 8	ch. 9	ch. 10	ch. 11

Table 2.7 燃料密度係数および温度変化

t = 200 sec

温度変化	℃
係数	$\times 10^{-5}$

上 ブ ラ ン ケ ット 部	+156	+154	+155	+155	+157	+162	+164	+161	-0.003	-0.001	-0.0003
	-0.177	-0.168	-0.146	-0.120	-0.095	-0.069	-0.049	-0.039			
上 ブ ラ ン ケ ット 部	+130	+129	+130	+133	+138	+141	+149	+145	-0.013	-0.004	-0.001
	-0.287	-0.288	-0.235	-0.225	-0.193	-0.182	-0.146	-0.125			
炉 心	+11	+33	+41	+52	+66	+64	+93	+89	-0.044	-0.012	-0.003
	-6.361	-5.490	-5.091	-4.399	-3.657	-3.853	-2.888	-2.404			
	-60	-35	-21	-20	+4	-1	+41	+35	-0.069	-0.020	-0.005
	-9.373	-7.897	-7.529	-6.594	-5.583	-6.167	-4.797	-4.038			
	-82	-70	-51	-33	-24	-16	+20	+17	-0.089	-0.027	-0.007
	-11.135	-9.177	-8.902	-7.817	-6.683	-7.543	-5.937	-5.025			
炉 心	-64	-66	-50	-27	-16	-25	+26	+21	-0.091	-0.028	-0.007
	-11.007	-9.009	-8.798	-7.728	-6.618	-7.476	-5.912	-4.998			
	-26	-22	-22	-4	+22	+15	+59	+58	-0.075	-0.022	-0.005
下 ブ ラ ン ケ ット 部	-9.185	-7.612	-7.347	-6.434	-5.479	-6.129	-4.775	-4.024			
	+77	+55	+69	+80	+93	+95	+124	+123	-0.051	-0.014	-0.003
下 ブ ラ ン ケ ット 部	-6.312	-5.376	-5.069	-4.408	-3.702	-3.937	-2.957	-2.462			
	+162	+162	+166	+170	+173	+176	+182	+182	-0.014	-0.004	-0.001
下 ブ ラ ン ケ ット 部	-0.182	-0.249	-0.189	-0.184	-0.196	-0.198	-0.170	-0.144			
	+185	+192	+194	+195	+195	+197	+198	+198	-0.003	-0.001	-0.0002
下 ブ ラ ン ケ ット 部	-0.116	-0.113	-0.098	-0.083	-0.071	-0.050	-0.033	-0.027			
	ch.1	ch.2	ch.3	ch.4	ch.5	ch.6	ch.7	ch.8	ch.9	ch.10	ch.11

Table 2.8 燃料密度係数および温度変化

t = 500 sec

温度変化	℃
係数	$\times 10^{-5}$

上 ブ ラ ン ケ ット 部	+282	+281	+281	+281	+285	+295	+300	+294	-0.003	-0.001	-0.0003
	-0.177	-0.168	-0.146	-0.120	-0.095	-0.069	-0.049	-0.039			
	+227	+227	+230	+236	+245	+251	+268	+260	-0.013	-0.004	-0.001
	-0.287	-0.288	-0.235	-0.225	-0.193	-0.182	-0.146	-0.125			
炉 心	0	+40	+56	+78	+105	+101	+156	+148	-0.044	-0.012	-0.003
	-6.361	-5.490	-5.091	-4.399	-3.657	-3.853	-2.888	-2.404			
	-130	-84	-58	-56	-12	-22	+57	+49	-0.069	-0.020	-0.005
	-9.373	-7.897	-7.529	-6.594	-5.583	-6.167	-4.797	-4.038			
	-170	-148	-113	-79	-62	-46	+18	+12	-0.089	-0.027	-0.007
	-11.135	-9.177	-8.902	-7.817	-6.683	-7.543	-5.937	-5.025			
	-136	-139	-101	-67	-48	-65	+31	+27	-0.091	-0.028	-0.007
	-11.007	-9.009	-8.793	-7.728	-6.618	-7.476	-5.912	-4.998			
	-65	-58	-58	-24	+23	+10	+93	+90	-0.075	-0.022	-0.005
	-9.185	-7.612	-7.347	-6.434	-5.479	-6.129	-4.775	-4.024			
	+125	+84	+110	+131	+163	+159	+215	+214	-0.051	-0.014	-0.003
	-6.312	-5.376	-5.069	-4.408	-3.702	-3.937	-2.957	-2.462			
下 ブ ラ ン ケ ット 部	+292	+294	+302	+308	+316	+321	+334	+334	-0.014	-0.004	-0.001
	-0.182	-0.249	-0.189	-0.184	-0.196	-0.198	-0.170	-0.144			
	+355	+356	+359	+360	+362	+366	+369	+369	-0.003	-0.001	-0.0002
	-0.116	-0.113	-0.098	-0.083	-0.071	-0.050	-0.033	-0.027			
	ch. 1	ch. 2	ch. 3	ch. 4	ch. 5	ch. 6	ch. 7	ch. 8	ch. 9	ch. 10	ch. 11

Table 2.9 燃料密度係数および温度変化

t=1000 sec

温度変化	℃
係数	$\times 10^{-5}$

上 ブ ラ ン ケ ット 部	-0.177	-0.168	-0.146	-0.120	-0.095	-0.069	-0.049	-0.039	-0.003	-0.001	-0.0003
	-0.287	-0.288	-0.235	-0.225	-0.193	-0.182	-0.146	-0.125	-0.013	-0.004	-0.001
炉	-28 -6.361	-5.490	-5.091	-4.399	-3.657	-3.853	-2.888	-2.404	-0.044	-0.012	-0.003
	-207 -9.373	-145 -7.897	-108 -7.529	-106 -6.594	-45 -5.583	-59 -6.167	-4.797	-4.038	-0.069	-0.020	-0.005
	-262 -11.135	-231 -9.177	-183 -8.902	-136 -7.817	-113 -6.683	-91 -7.543	-2 -5.937	-11 -5.025	-0.089	-0.027	-0.007
	-215 -11.007	-218 -9.009	-167 -8.793	-119 -7.728	-94 -6.618	-117 -7.476	-5.912	-4.998	-0.091	-0.028	-0.007
	-117 -9.185	-106 -7.612	-107 -7.347	-60 -6.434	-5.479	-13 -6.129	-4.775	-4.024	-0.075	-0.022	-0.005
	-6.312	-5.376	-5.069	-4.408	-3.702	-3.937	-2.957	-2.462	-0.051	-0.014	-0.003
下 ブ ラ ン ケ ット 部	-0.182	-0.249	-0.189	-0.184	-0.196	-0.198	-0.170	-0.144	-0.014	-0.004	-0.001
	-0.116	-0.113	-0.098	-0.083	-0.071	-0.050	-0.033	-0.027	-0.003	-0.001	-0.0002
	ch.1	ch.2	ch.3	ch.4	ch.5	ch.6	ch.7	ch.8	ch.9	ch.10	ch.11

Table 2.10 燃料密度係数および温度変化

t = 1500 sec

温度変化	℃
係数	$\times 10^{-5}$

上 ブ ラ ン ケ ット 部	+407	+404	+406	+404	+414	+430	+441	+429	-0.003	-0.001	-0.0003
	-0.177	-0.168	-0.146	-0.120	-0.095	-0.069	-0.049	-0.039			
部	+315	+314	+329	+330	+344	+354	+384	+371	-0.013	-0.004	-0.001
	-0.287	-0.288	-0.235	-0.225	-0.193	-0.182	-0.146	-0.125			
炉 心	-49	+12	+37	+71	+114	+107	+196	+184	-0.044	-0.012	-0.003
	-6361	-5490	-5091	-4399	-3657	-3853	-2888	-2404			
	-247	-178	-137	-135	-67	-83	+39	+27	-0.069	-0.020	-0.005
	-9373	-7897	-7529	-6594	-5583	-6167	-4797	-4038			
	-307	-274	-220	-168	-143	-118	-20	-29	-0.089	-0.027	-0.007
	-11135	-9177	-8902	-7817	-6683	-7543	-5937	-5025			
-255	-258	-202	-149	-122	-147	-1	-7	-0.091	-0.028	-0.007	
-11007	-9009	-8793	-7728	-6618	-7476	-5912	-4998				
心	-146	-134	-136	-84	-11	-31	+95	+92	-0.075	-0.022	-0.005
	-9185	-7612	-7347	-6434	-5479	-6129	-4775	-4024			
部	+145	+82	+123	+156	+206	+200	+291	+289	-0.051	-0.014	-0.003
	-6312	-5376	-5069	-4408	-3702	-3937	-2957	-2462			
下 ブ ラ ン ケ ット 部	+422	+425	+439	+449	+463	+470	+494	+494	-0.014	-0.004	-0.001
	-0.182	-0.249	-0.189	-0.184	-0.196	-0.198	-0.170	-0.144			
部	+531	+532	+538	+540	+545	+551	+556	+556	-0.003	-0.001	-0.0002
	-0.116	-0.113	-0.098	-0.083	-0.071	-0.050	-0.033	-0.027			
	ch. 1	ch. 2	ch. 3	ch. 4	ch. 5	ch. 6	ch. 7	ch. 8	ch. 9	ch. 10	ch. 11

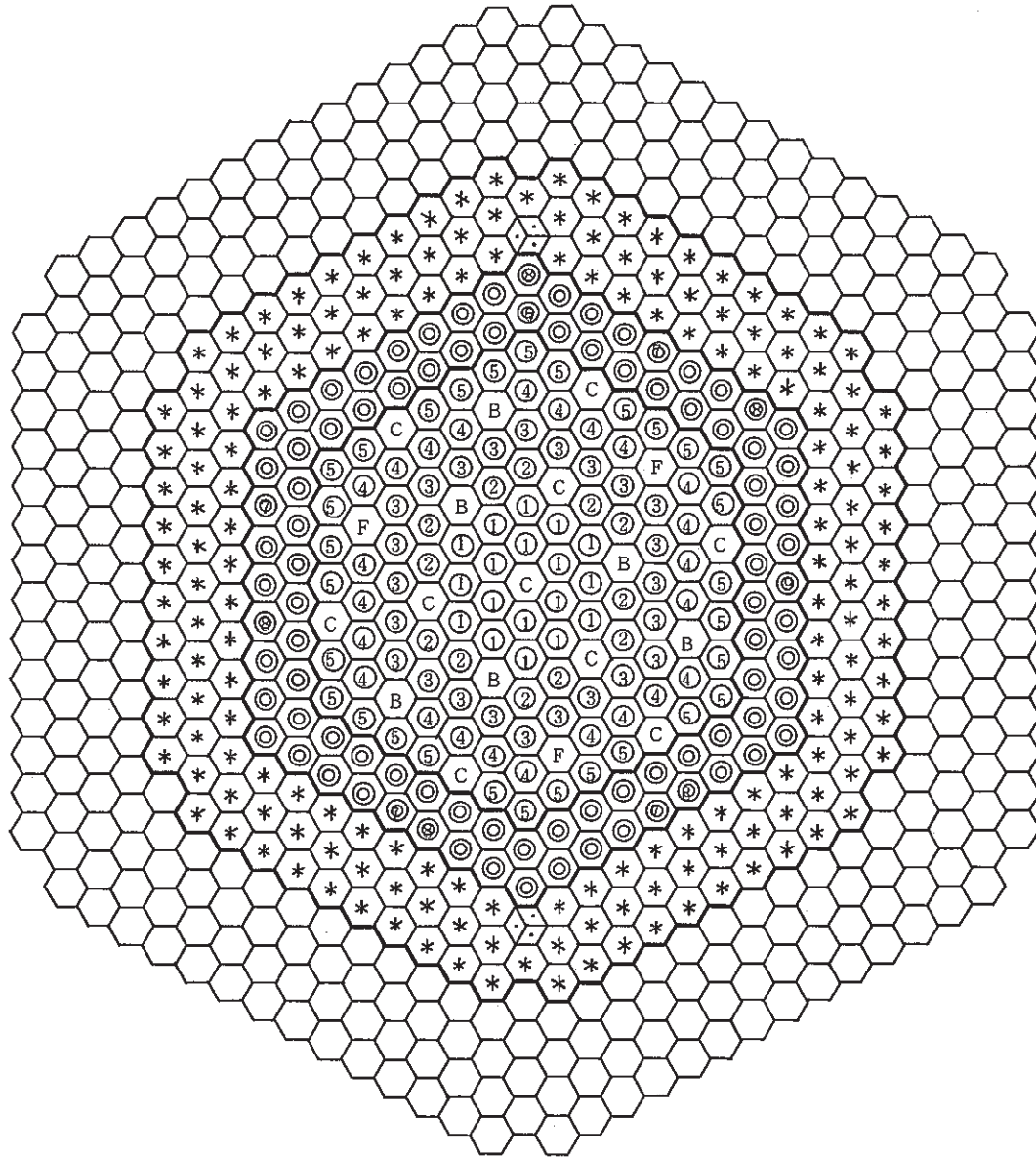
Table 2.11 フィードバックモデル追加による投入反応度への影響
($t=500$ (sec))

	CASE1 (改良前)	CASE2 (除支持板膨張)	CASE3 (全モデル)
ドップラー効果	- 8.2	- 9.7	- 7.2
冷却材密度効果	5.3	5.3	5.3
燃料軸方向膨張効果	1.0	- 0.4	0.9
構造材膨張効果	無	2.8	2.7
炉心支持板膨張効果	無	無	- 4.0
全投入反応度	- 1.9	- 2.0	- 2.3
比出力 (%)	43	45	42

Table 3.2 ULOHS事故時におけるプラント応答の比較

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
断熱機器	IHX (0 sec)	SG (40 sec)	SG (40 sec)	SG (40 sec)
2次系	-	定格流量	強制循環	自然循環
原子炉出力*	42%	66%	56%	53%
AOT(650℃)	186 sec	390 sec	276 sec	258 sec
投入反応度				
ドップラー*	-7.2¢	-4.9¢	-5.6¢	-6.0¢
Na密度*	5.3¢	3.1¢	4.0¢	4.3¢
燃料膨張*	0.9¢	0.7¢	1.0¢	1.0¢
支持板膨張*	-4.0¢	-1.8¢	-2.8¢	-3.0¢
構造材膨張*	2.7¢	1.6¢	2.0¢	2.2¢
合計*	-2.3¢	-1.3¢	-1.4¢	-1.5¢

* 500 secにおける値である。



流量領域	炉心構成要素
1	内側炉心
2	"
3	"
4	"
5	"
6	外側炉心
7	"
8	"
9	半径方向ブランケット
10	"
11	"
12	制御棒
13	中性子反射体
14	バイパス

Fig. 2.1 もんじゅ炉心構成とチャンネル分割

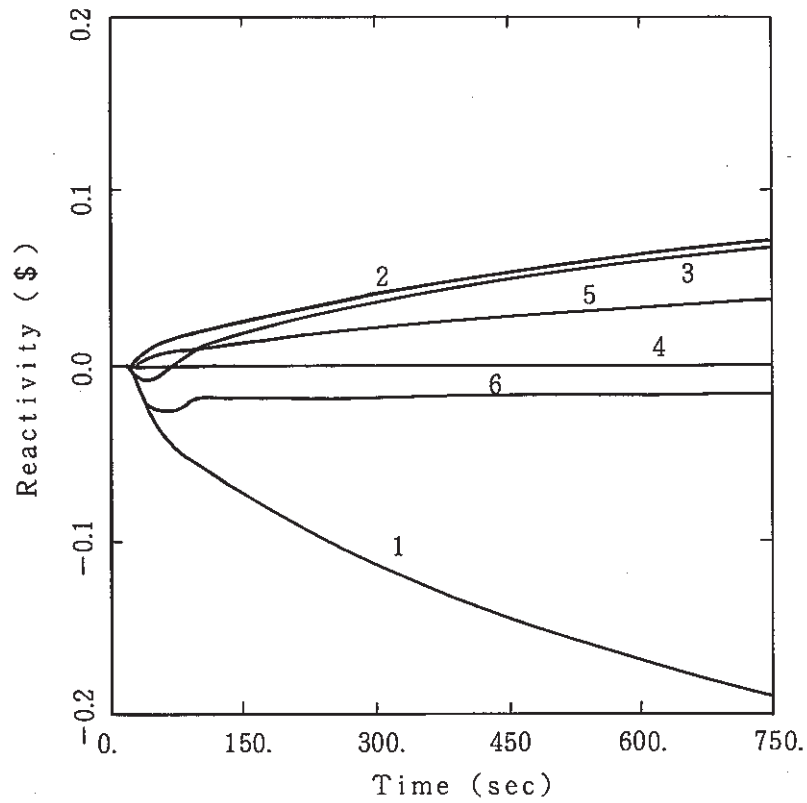


Fig. 2.2 投入反応度変化 (支持板膨張効果を除く)
1 : ドップラー 2 : Na ボイド 3 : 燃料軸方向膨張
4 : 支持板膨張 5 : 構造材膨張 6 : TOTAL

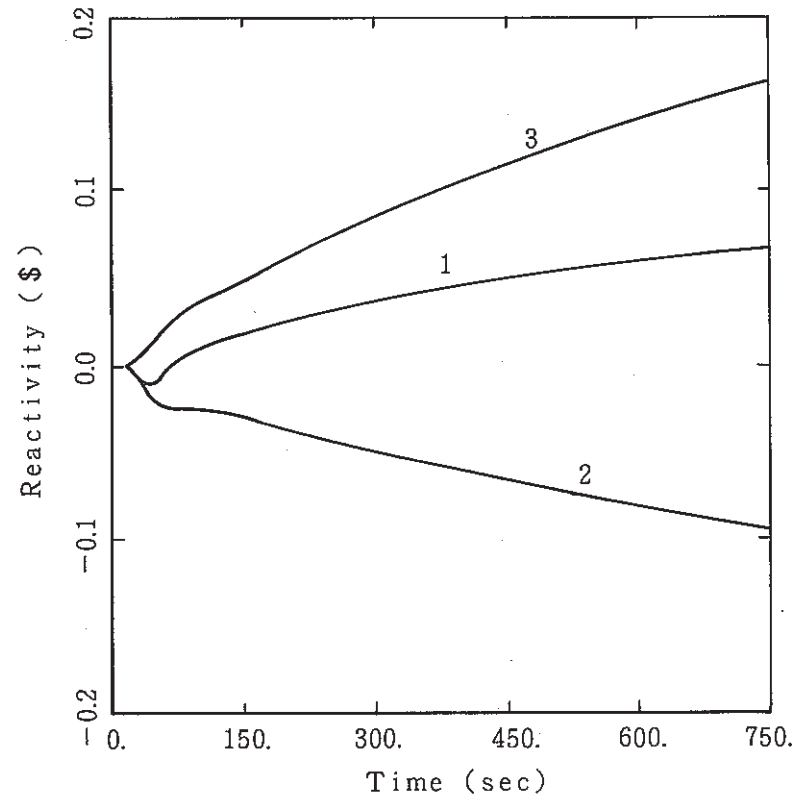


Fig. 2.3 燃料軸方向膨張効果
1 : TOTAL
2 : 密度効果
3 : 形状効果

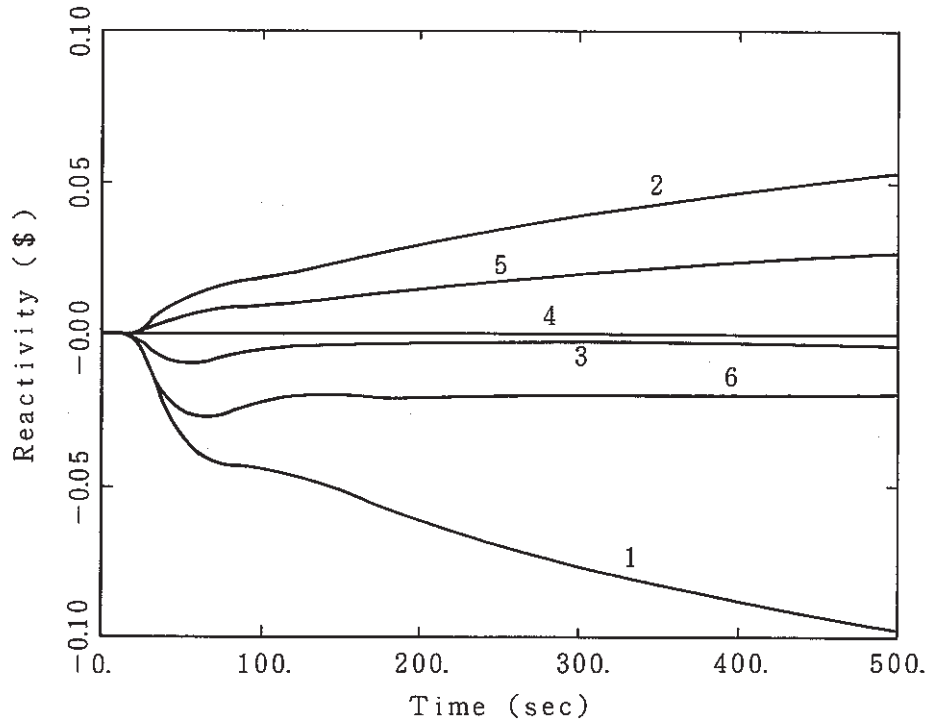


Fig. 2.4 投入反応度変化
 1 : ドップラー 2 : Na ボイド 3 : 燃料軸方向膨張
 4 : 支持板膨張 5 : 構造材膨張 6 : TOTAL

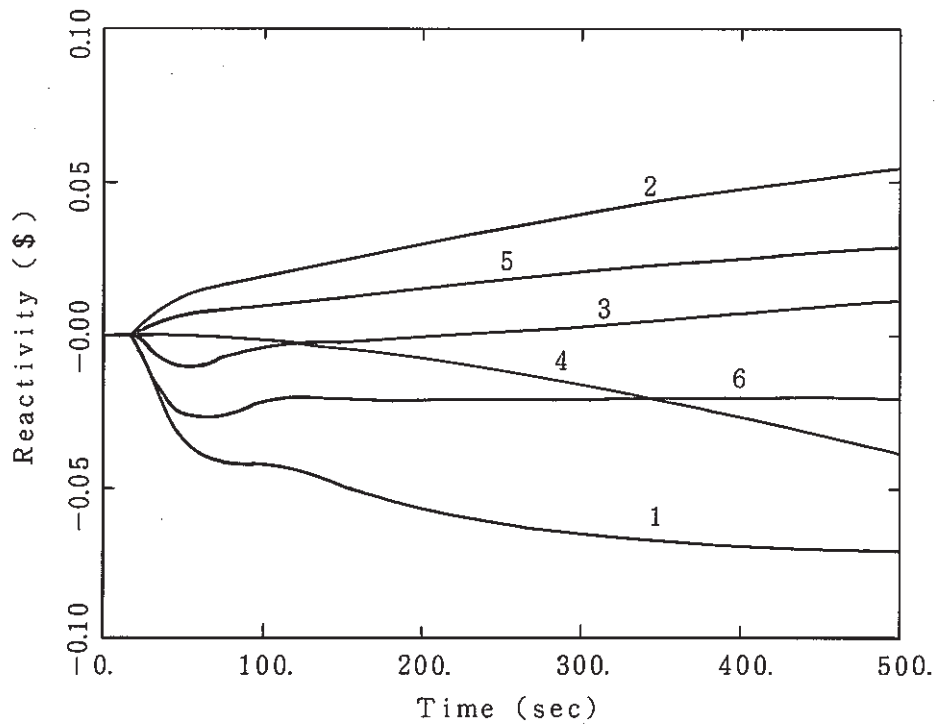


Fig. 2.5 投入反応度変化 (支持板膨張効果を考慮)
 1 : ドップラー 2 : Na ボイド 3 : 燃料軸方向膨張
 4 : 支持板膨張 5 : 構造材膨張 6 : TOTAL

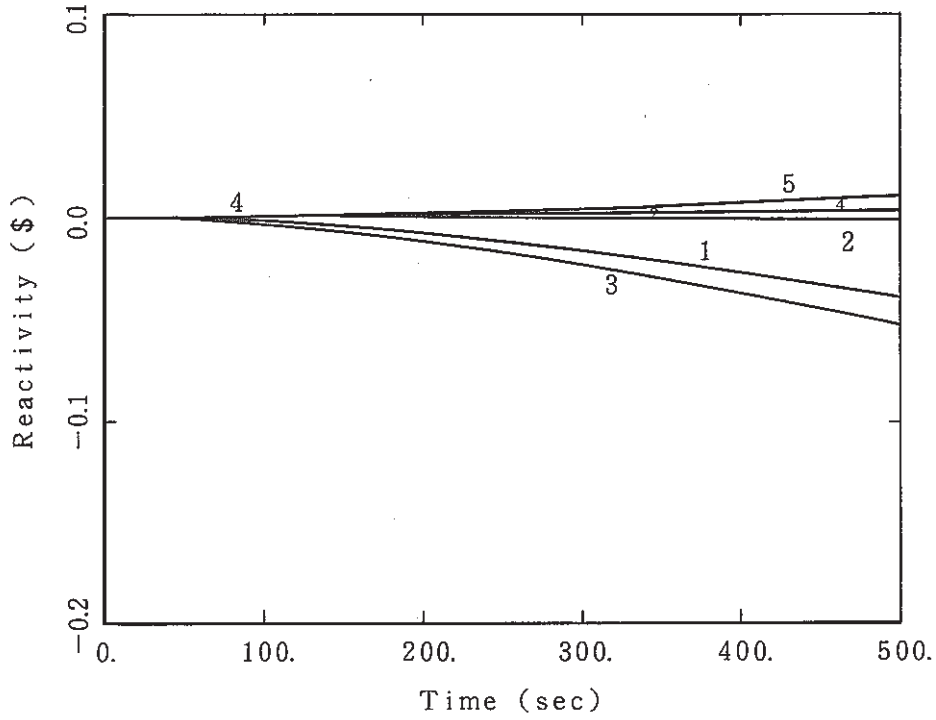


Fig. 2.6 炉心支持板膨張効果

1 : TOTAL

2 : Na 流入効果

3 : 燃料密度効果

4 : 構造材密度効果

5 : 形状効果

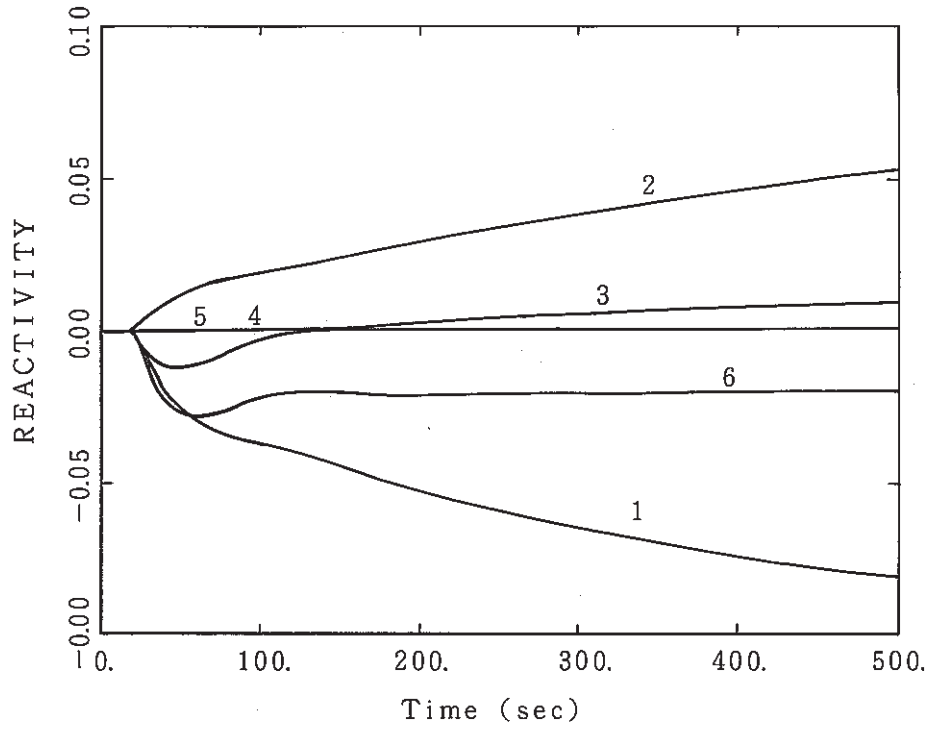


Fig. 2.7 投入反応度変化

- 1 : ドップラー効果
- 2 : 冷却材密度効果
- 3 : 燃料軸方向膨張による密度効果
- 4 : 支持板膨張効果
- 5 : 構造材膨張効果
- 6 : 全投入反応度

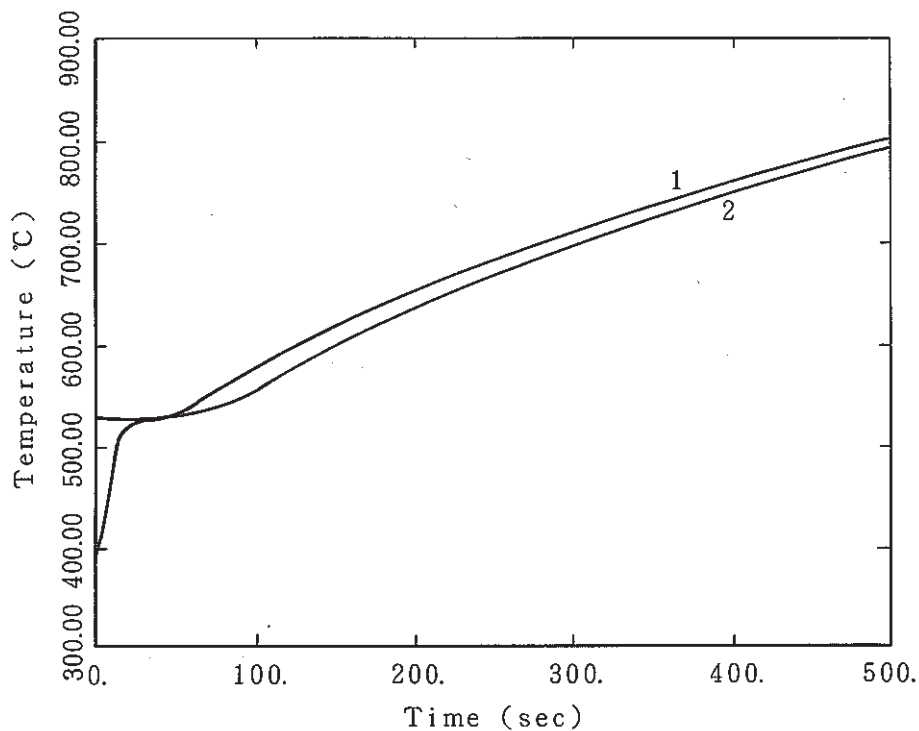


Fig. 3.1 1次系冷却材温度变化(CASE1)
1 : IHX入口温度
2 : IHX出口温度

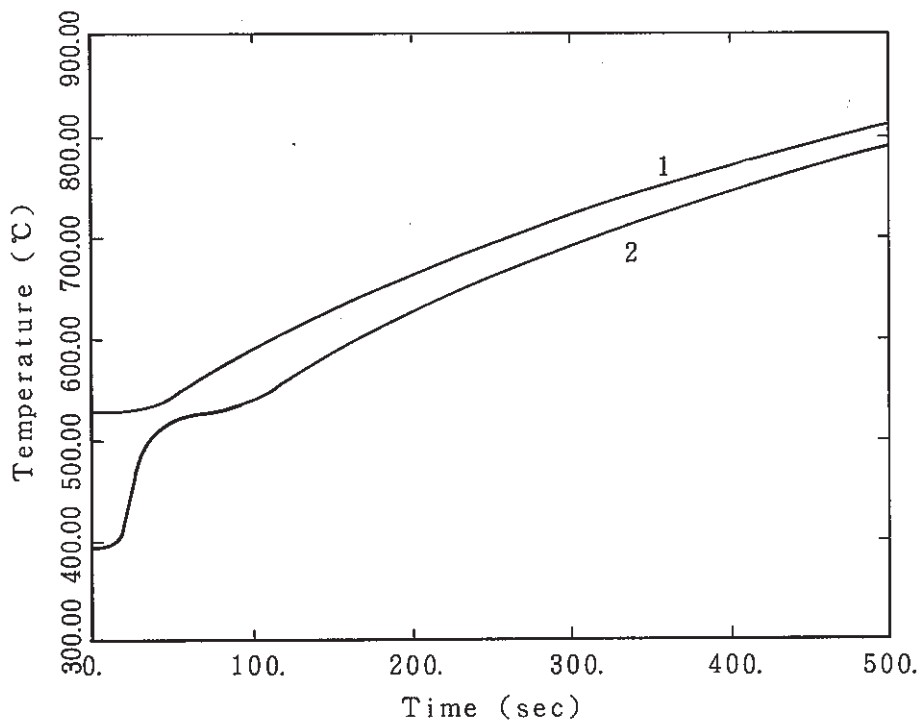


Fig. 3.2 1次系冷却材温度变化(CASE1)
1 : 原子炉容器出口温度
2 : 原子炉容器入口温度

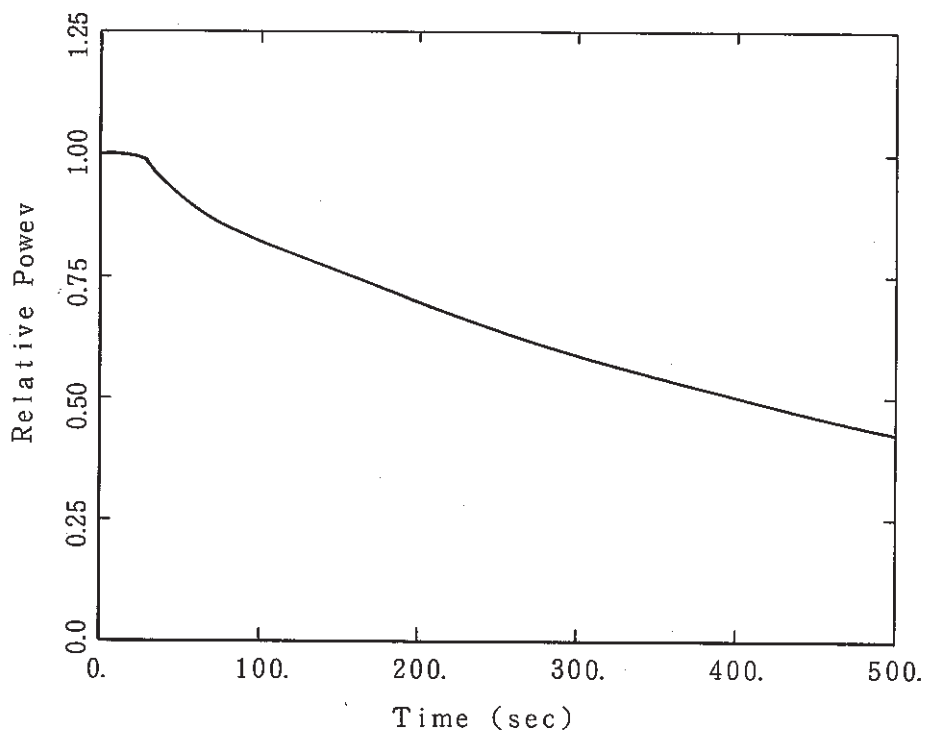


Fig. 3.3 原子炉熱出力(相対値)(CASE1)

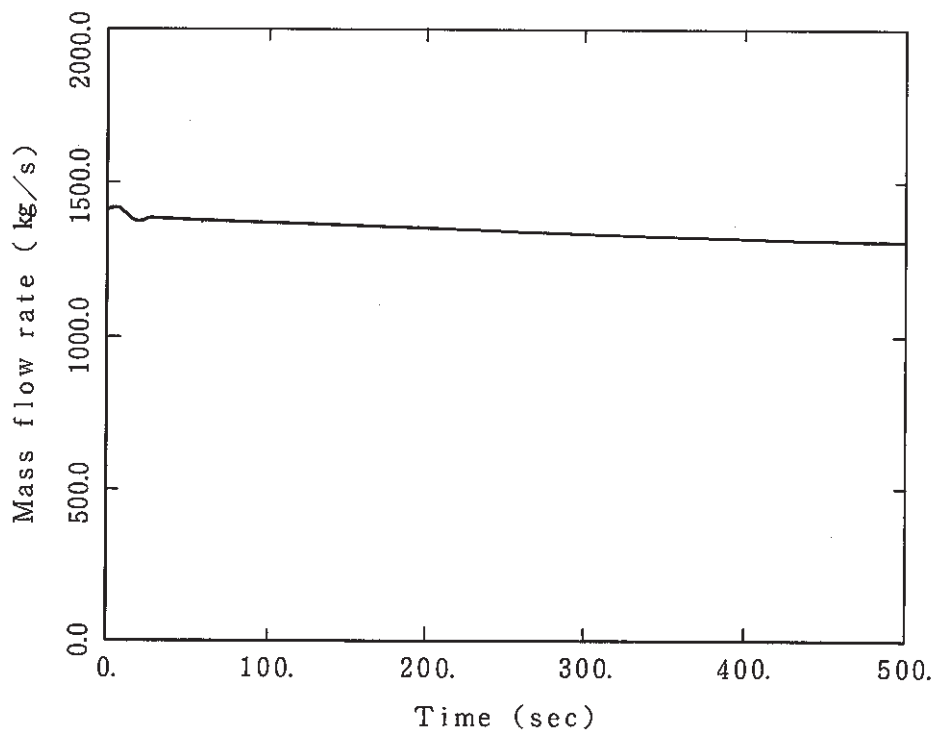


Fig. 3.4 1次系冷却材流量(CASE1)

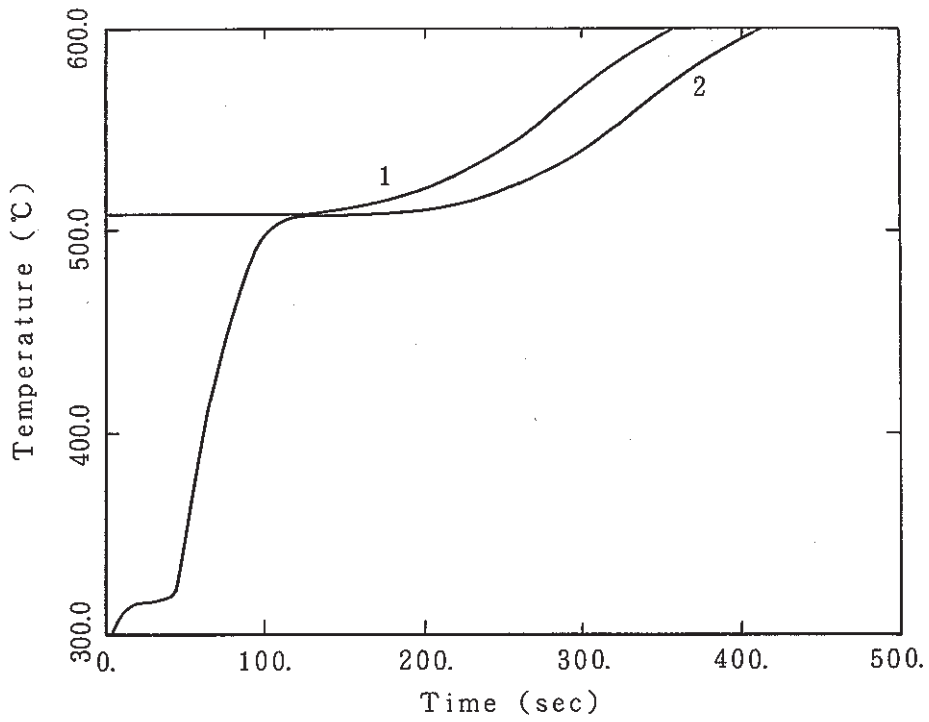


Fig. 3.5 2次系冷却材温度变化 (CASE2)

1 : SG 入口温度

2 : SG 出口温度

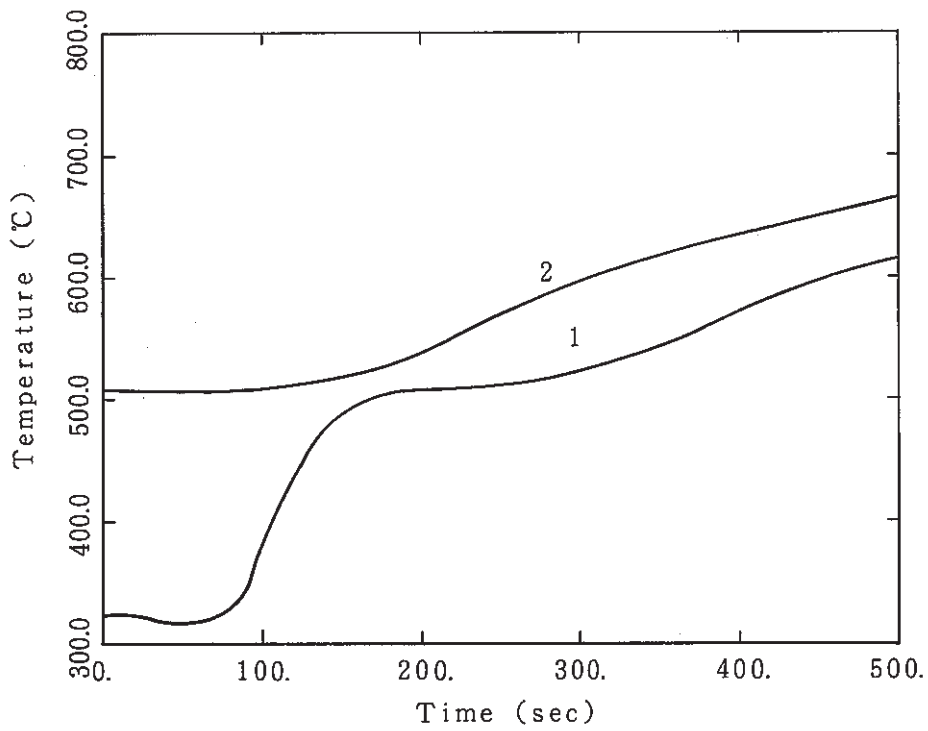


Fig. 3.6 2次系冷却材温度变化 (CASE2)

1 : IHX 入口温度

2 : IHX 出口温度

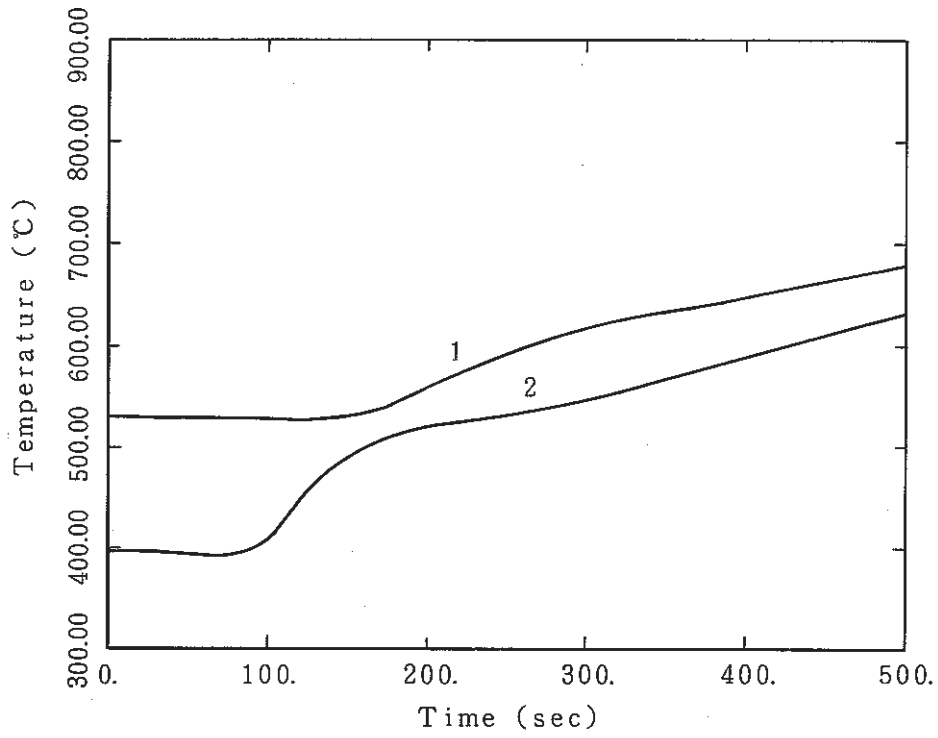


Fig. 3.7 1次系冷却材温度变化(CASE2)

1 : I H X 入口温度

2 : I H X 出口温度

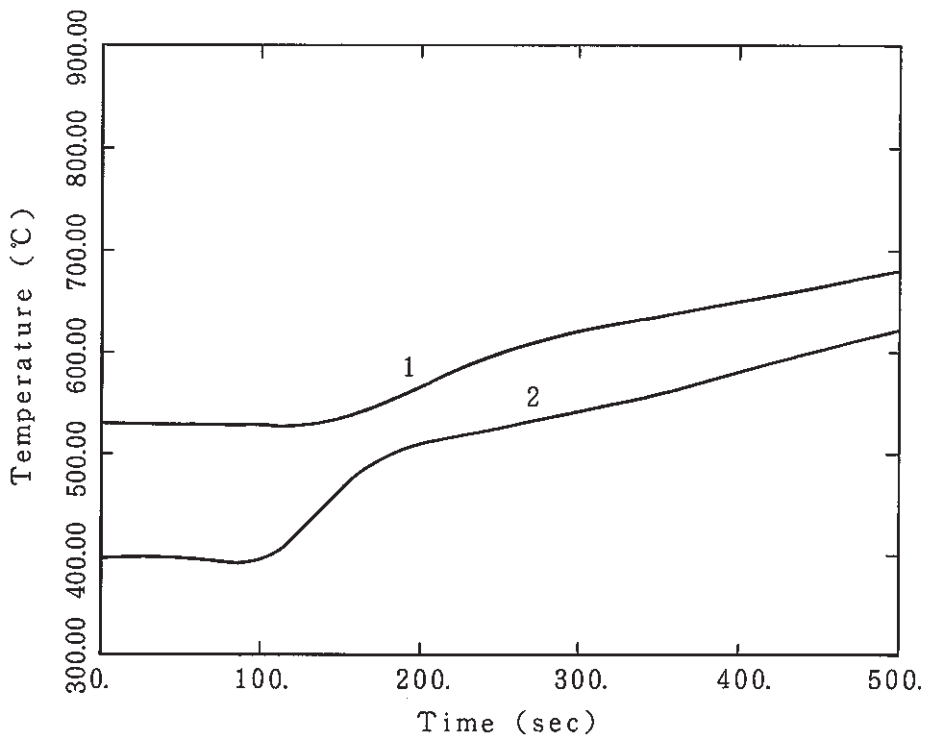


Fig. 3.8 1次系冷却材温度变化(CASE2)

1 : 原子炉容器出口温度

2 : 原子炉容器入口温度

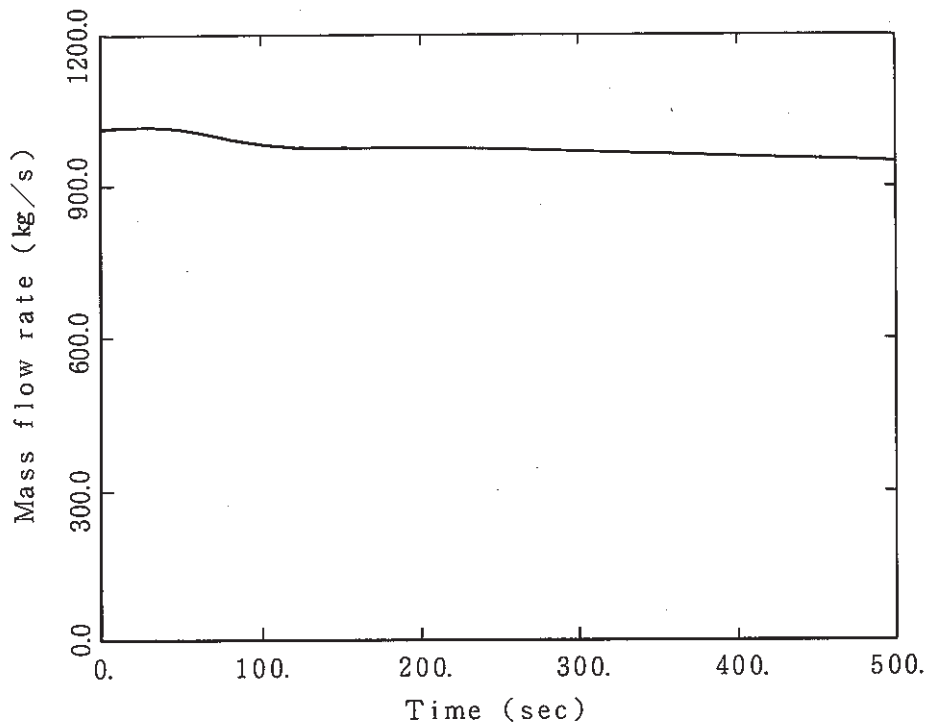


Fig. 3.9 2次系冷却材流量变化(CASE2)

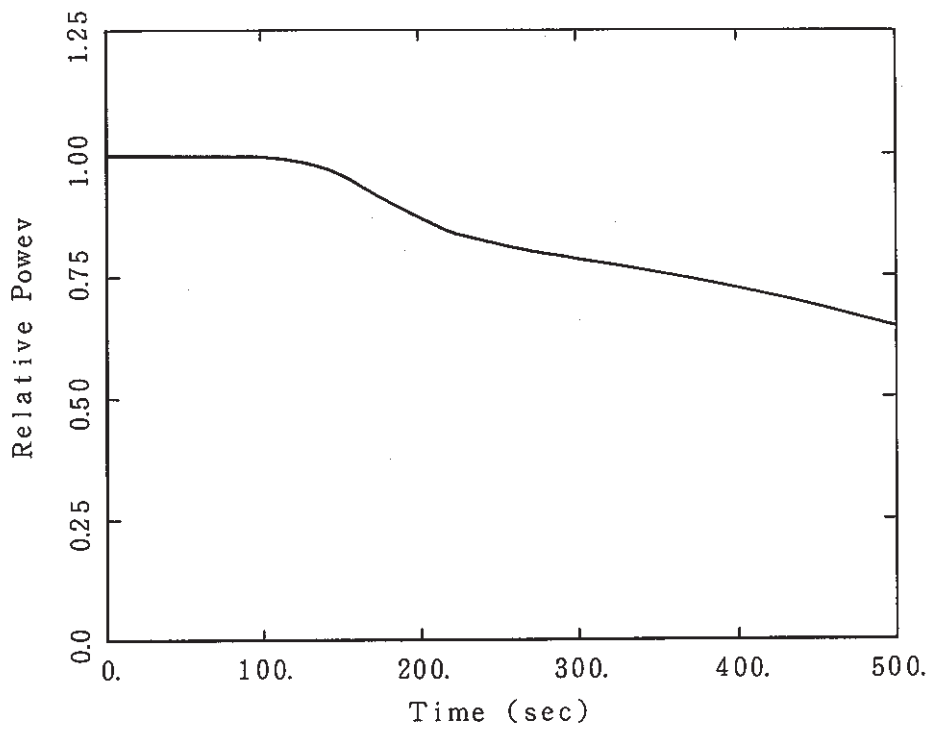


Fig. 3.10 原子炉热出力(相对值)(CASE2)

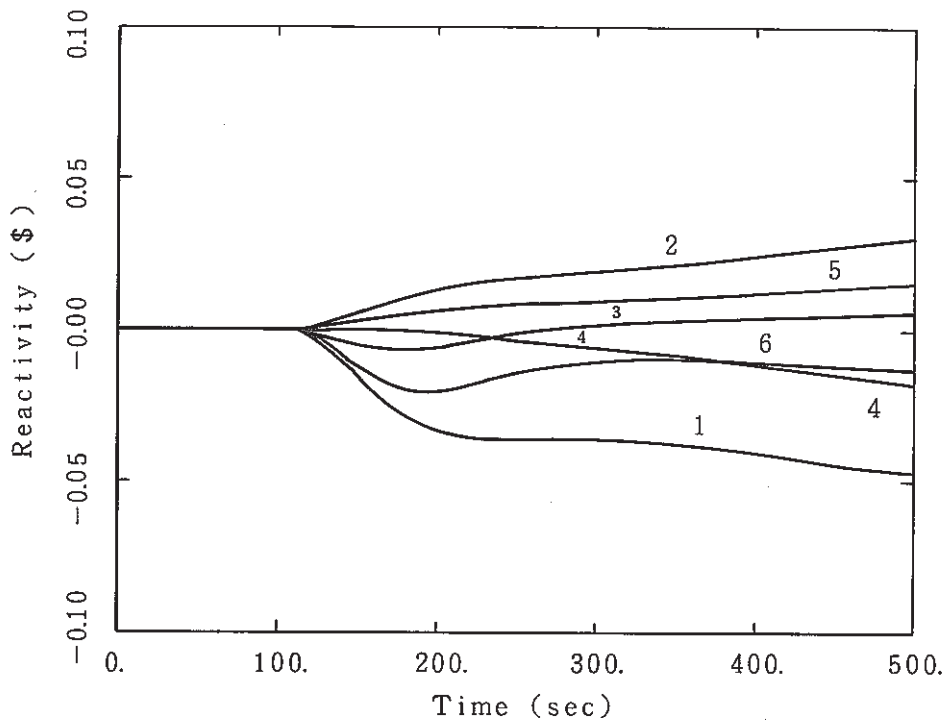


Fig. 3.11 投入反応度変化 (CASE 2)

1 : ドップラー 2 : Na ボイド 3 : 燃料軸方向膨張
 4 : 支持板膨張 5 : 構造材膨張 6 : TOTAL

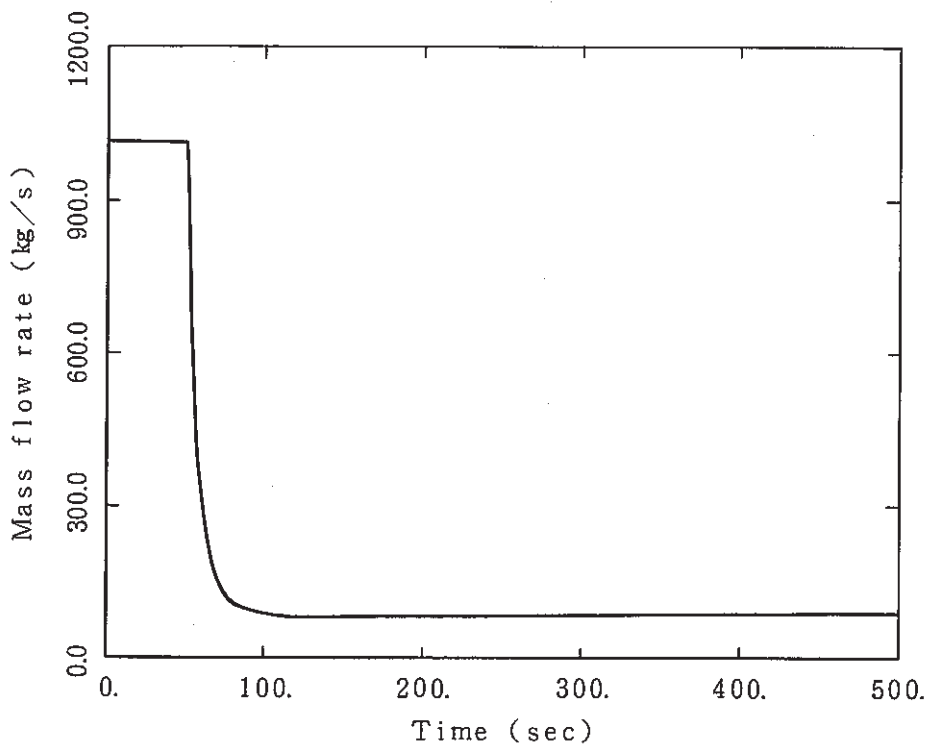


Fig. 3.12 2次系冷却材流量変化 (CASE 3)

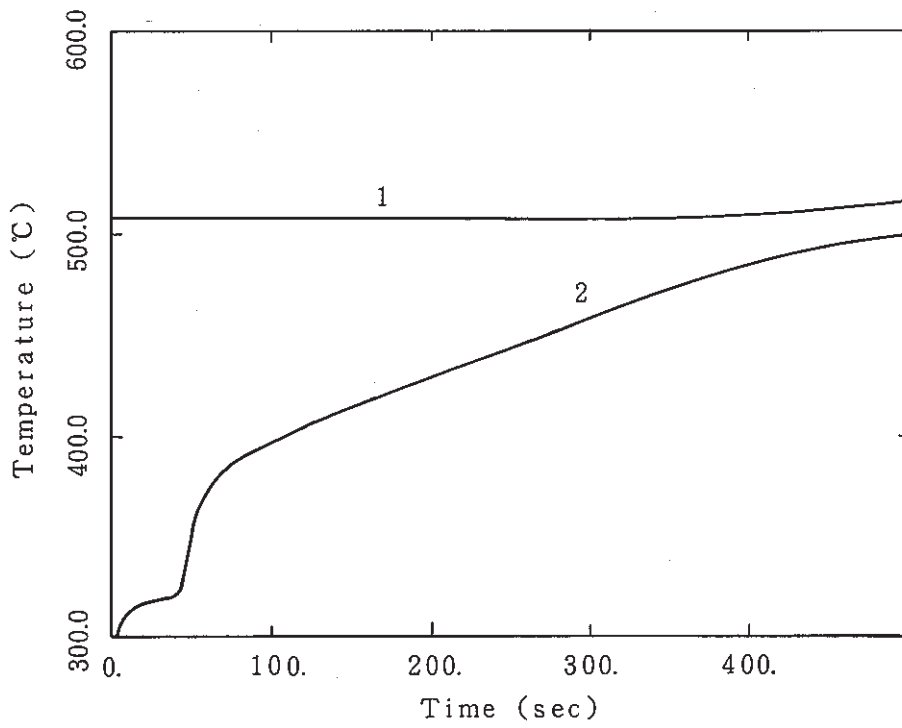


Fig. 3.13 2次系冷却材温度变化(CASE3)
1: SG入口温度
2: SG出口温度

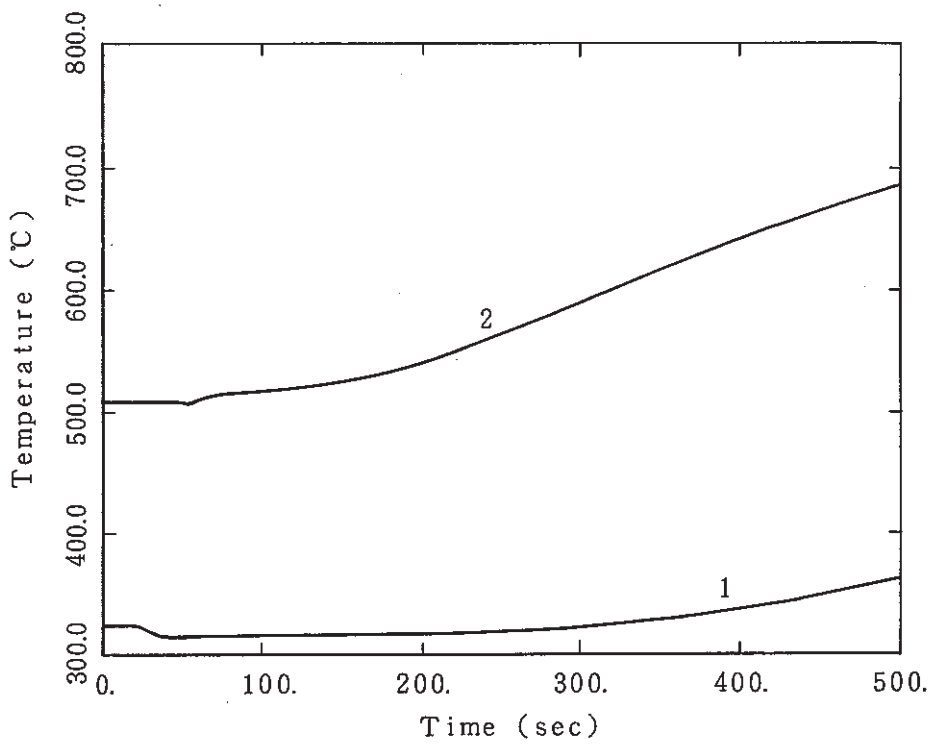


Fig. 3.14 2次系冷却材温度变化(CASE3)
1: IHX入口温度
2: IHX出口温度

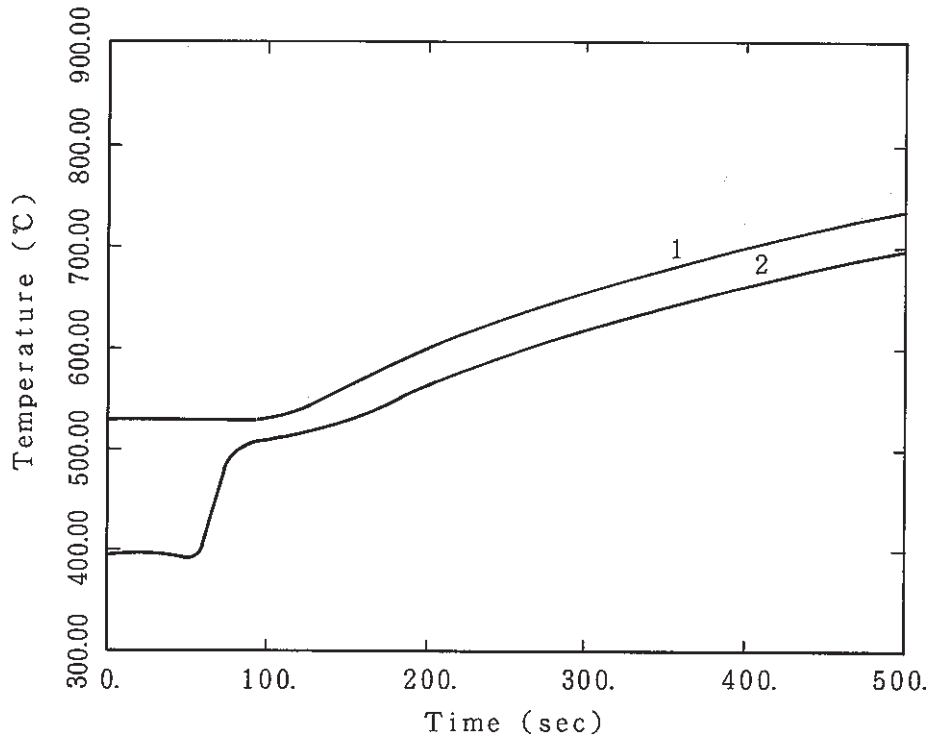


Fig. 3.15 1次系冷却材温度变化(CASE3)

1 : IHX入口温度

2 : IHX出口温度

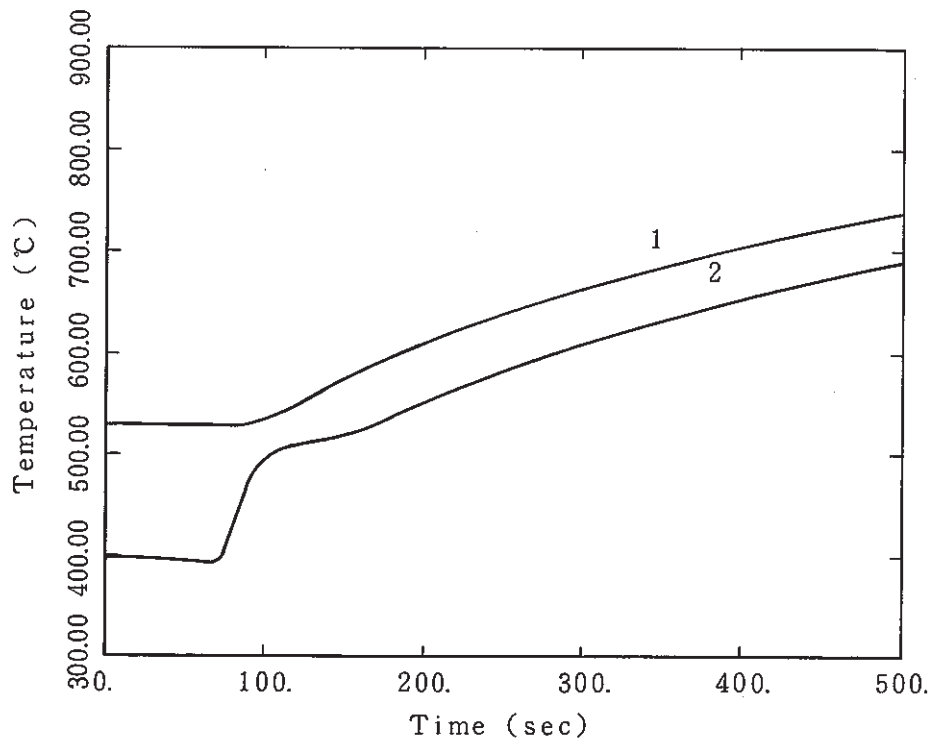


Fig. 3.16 1次系冷却材温度变化(CASE3)

1 : 原子炉容器出口温度

2 : 原子炉容器入口温度

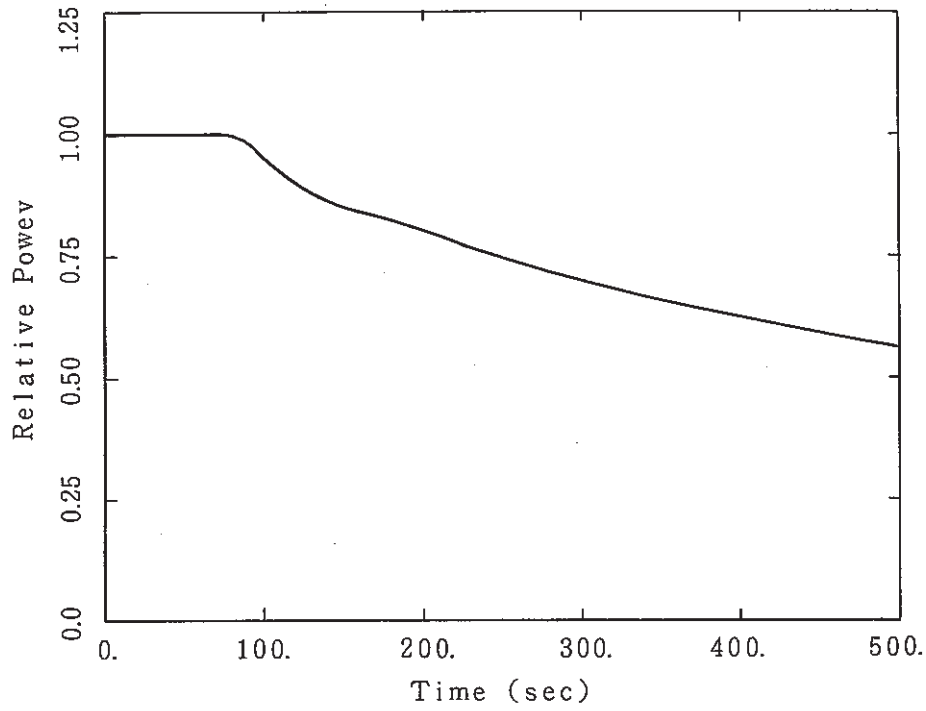


Fig. 3.17 原子炉熱出力(相対値)(CASE3)

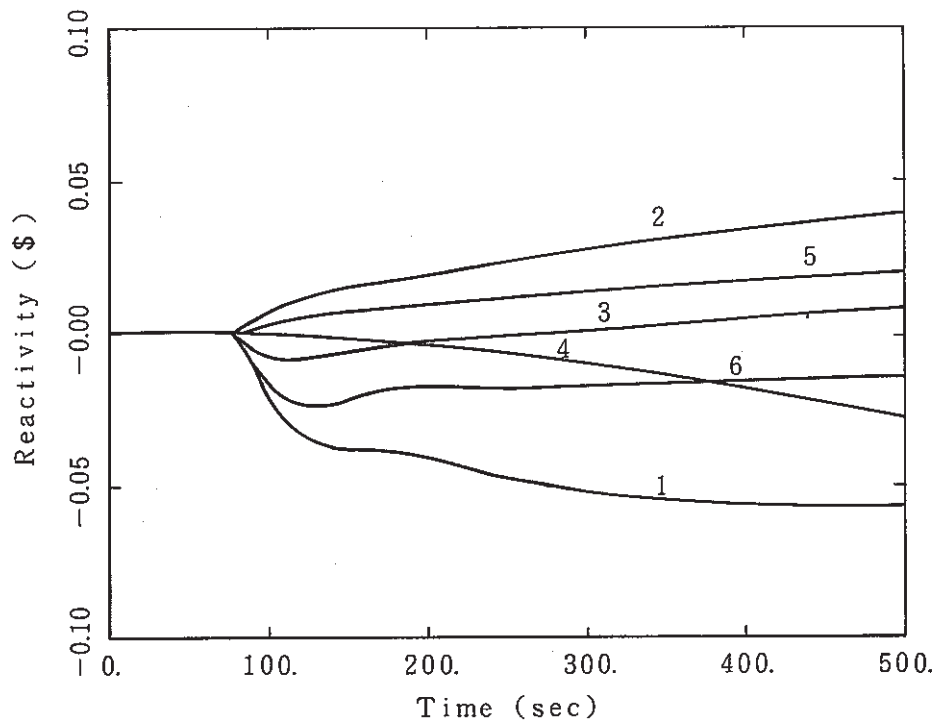


Fig. 3.18 投入反応度変化(CASE3)

- 1 : ドップラー 2 : Na ボイド 3 : 燃料軸方向膨張
 4 : 支持板膨張 5 : 構造材膨張 6 : TOTAL

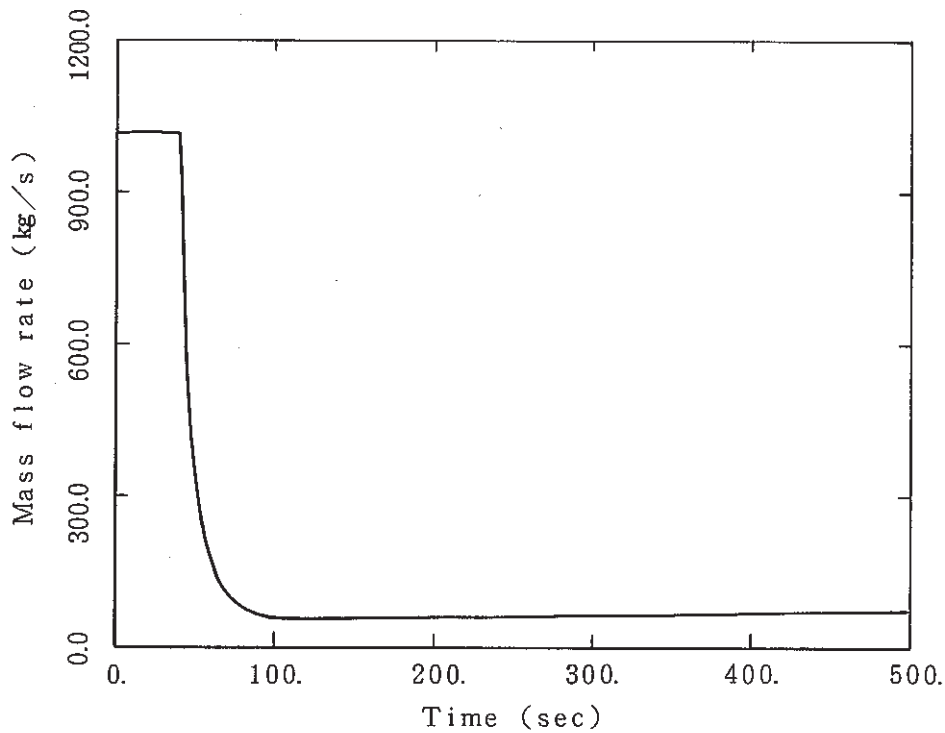


Fig. 3.19 2次系冷却材流量变化(CASE4)

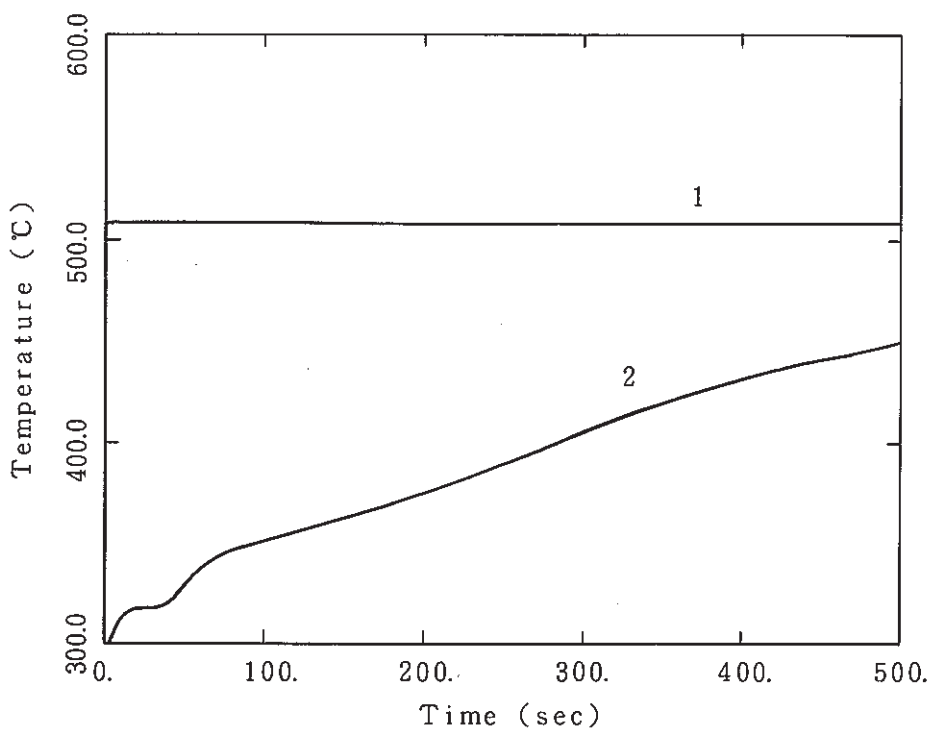


Fig. 3.20 2次系冷却材温度变化(CASE4)

1 : SG入口温度
2 : SG出口温度

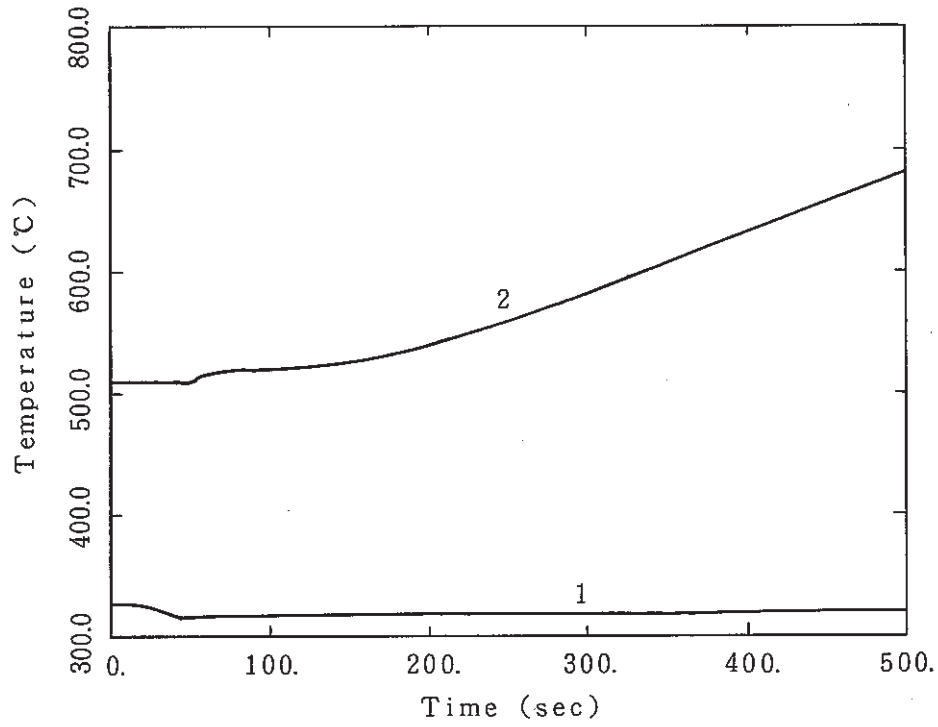


Fig. 3.21 2次系冷却材温度变化(CASE4)
1: IHX入口温度
2: IHX出口温度

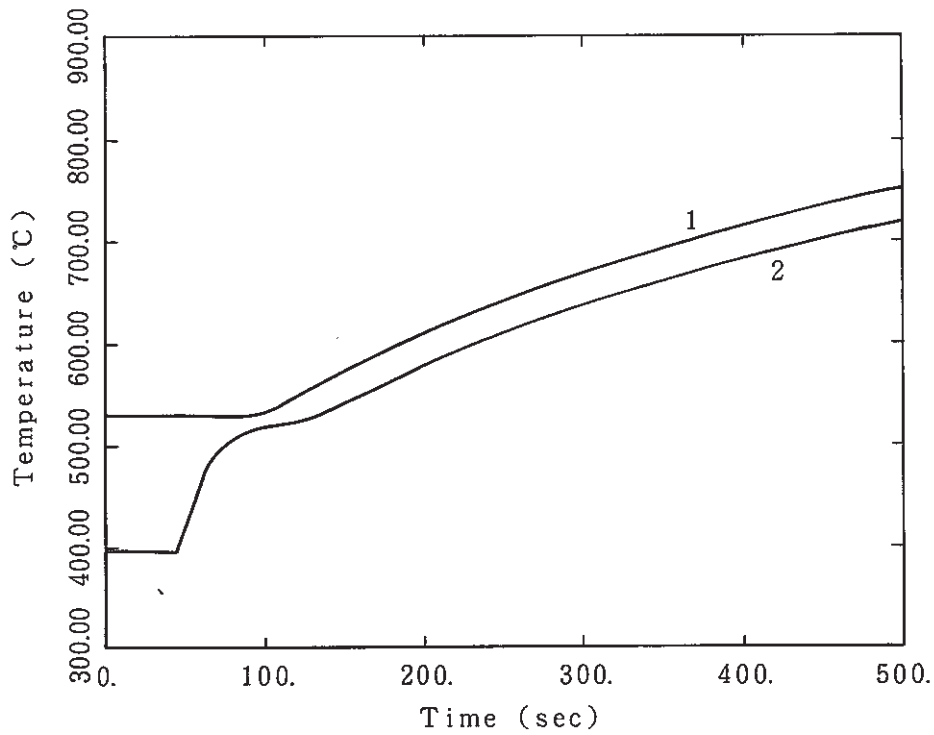


Fig. 2.22 1次系冷却材温度变化(CASE4)
1: IHX入口温度
2: IHX出口温度

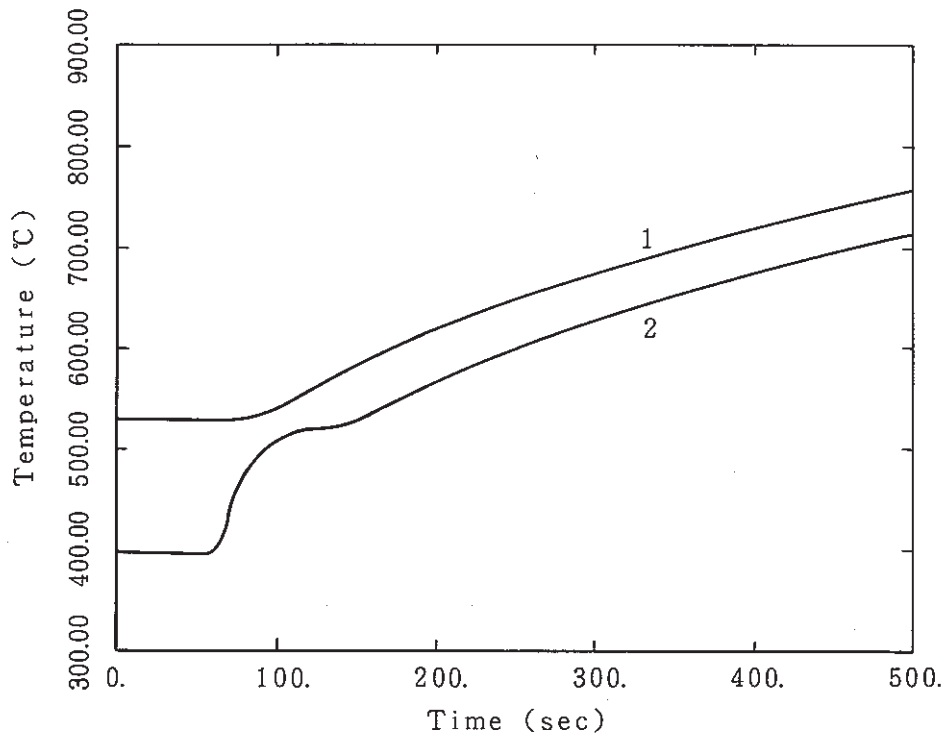


Fig. 3.23 1次系冷却材温度变化(CASE4)
1: 原子炉容器出口温度
2: 原子炉容器入口温度

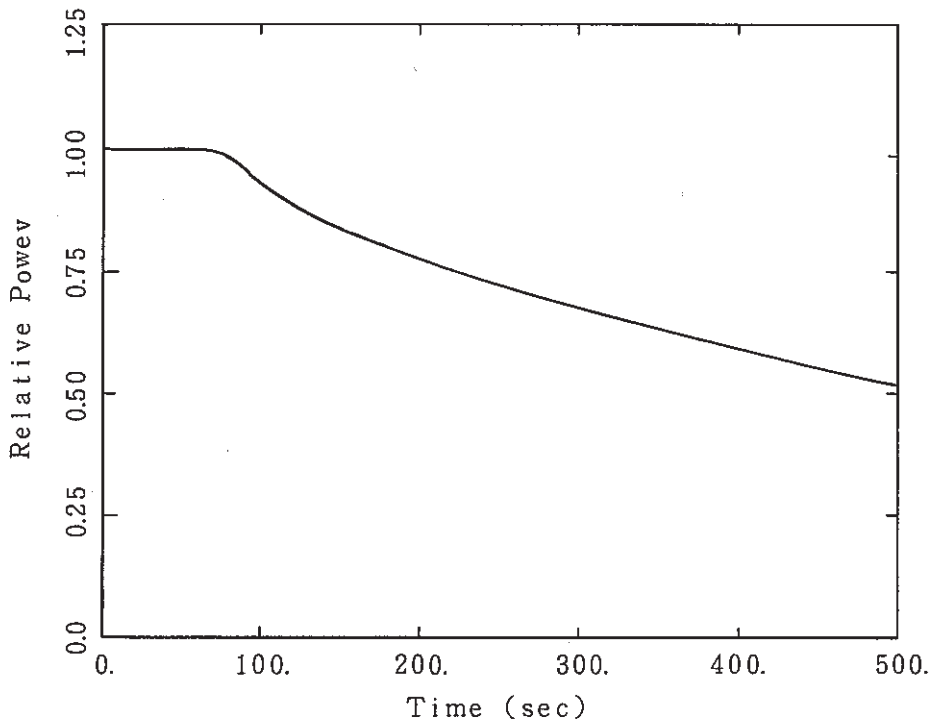


Fig. 3.24 原子炉热出力(相对值)(CASE4)

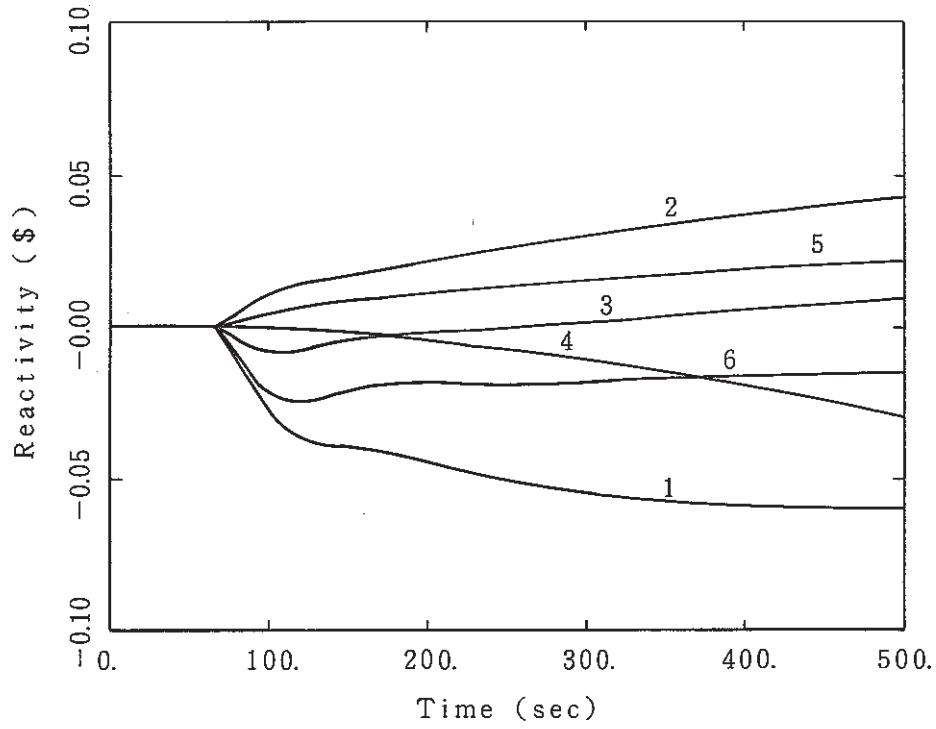


Fig. 3.25 投入反応度変化(CASE4)

- 1 : ドップラー
- 2 : Na ボイド
- 3 : 燃料軸方向膨張
- 4 : 支持板膨張
- 5 : 構造材膨張
- 6 : TOTAL

APPENDIX

<炉心支持板の膨張について>

反応度フィードバックにおける炉心支持板膨張効果では、自由な熱膨張が仮定されている。しかし、実際には原子炉容器などによって拘束を受けるものと考えられるため、この仮定のままでは反応度のフィードバック（この場合、負）が過大に評価されてしまう可能性がある。そこで、ここでは拘束のある場合の膨張について考察を行い、膨張量を補正するファクターを評価する。

まず、Fig. A.1に示すように原子炉容器を円筒（半径 r ）に、また、炉心支持板を円板（半径 $r + \Delta R$ ； ΔR は膨張量）と仮定して、単純なはめ込みモデルを考える。

一般に弾性基礎の上に支えられたはりの曲げは次式を満たし、

$$EI_z \frac{d^4 y}{dx^4} = -k y \quad \dots\dots\dots (A-1)$$

その一般解は、

$$y = e^{\beta x} (A \cos \beta x + B \sin \beta x) + e^{-\beta x} (C \cos \beta x + D \sin \beta x) \quad \dots\dots (A-2)$$

但し、

$$\beta = \sqrt{k/4EI_z} \quad \dots\dots\dots (A-3)$$

と表される。無限長はりに点荷重 P [N/m] がかかる場合 (Fig. A.2) と、長さ l ($l = b + c$) だけ等分布荷重 q がかかる場合、(Fig. A.3)、(A.2) 式はそれぞれ次のようになる。

$$y = \frac{P}{8\beta^3 EI_z} e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x) \quad \dots\dots\dots (A-4)$$

$$y = \frac{q}{k} \left(1 - \frac{e^{-\beta b}}{2} \cos \beta b - \frac{e^{-\beta c}}{2} \cos \beta c \right) \quad \dots\dots\dots (A-5)$$

局部的に曲げを受ける円筒殻（肉厚 h 、半径 r ）の曲げ剛性は、

$$EI_z = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad \dots\dots\dots (A-6)$$

であり、また、

$$P r = \sigma h = E h \frac{y}{r} \dots\dots\dots (A-7)$$

が成立することにより,

$$k = \frac{E h}{r^2} \dots\dots\dots (A-8)$$

これより (A.2) 式の β は,

$$\beta = \sqrt{\frac{3(1-\nu^2)}{r^2 h^2}} \dots\dots\dots (A-9)$$

となる。

一方, 円筒 (中実円板を含む) の平衡方程式は, Fig.A.4 より

$$r \frac{d a_r}{d r} + a_r - a_\theta = 0 \dots\dots\dots (A-10)$$

径方向変位を U , 軸方向変位を W としたとき, 応力, 歪, 変位の関係は,

$$\frac{d u}{d r} = \epsilon_r = \frac{1}{E} \{ a_r - \nu (a_t + a_z) \} \dots\dots\dots (A-11)$$

$$\frac{u}{r} = \epsilon_t = \frac{1}{E} \{ a_t - \nu (a_z + a_r) \} \dots\dots\dots (A-12)$$

$$\frac{d w}{d r} = \epsilon_z = \frac{1}{E} \{ a_z - \nu (a_r + a_t) \} \dots\dots\dots (A-13)$$

平面応力状態 ($\sigma_z = 0$) として (A.9) ~ (A.12) 式を解くと,

$$u = \frac{1+\nu}{E} \frac{r}{r_1^2 - r_0^2} \left\{ \frac{1-\nu}{1+\nu} r_0^2 p_0 - r_1^2 p_1 + \frac{r_0^2 r_1^2}{r^2} (p_0 - p_1) \right\} \dots\dots\dots (A-14)$$

円板 ($r_0 = 0$) では,

$$u = -\frac{1-\nu}{E} r p_1 \dots\dots\dots (A-15)$$

となる。

以上より, 炉心支持板の膨張を 1 点で支えると仮定した場合, 板厚を t として $p_0 t = p$ である

から (A.3) 式 (X=0 とする) および (A.14) 式を用いて,

$$\frac{p}{8\beta^3 EI_z} + \frac{1-\nu}{E} r \frac{p}{t} = \Delta R \quad \dots\dots\dots (A-16)$$

Table A.1 の数値を代入して,

$$P = 5.02 \times 10^3 \Delta R \quad [N/m] \quad \dots\dots\dots (A-17)$$

よって,

$$y = 0.976 \Delta R \quad \dots\dots\dots (A-18)$$

また, 長さ l (= 890 mm : 炉心支持板と原子炉容器の結合面高さ) で支持すると仮定した場合は, $q_1 = pot$ ゆえ (A.4) 式および (A.14) 式より,

$$\frac{q}{k} \left(1 - \frac{e^{-\beta b}}{2} \cos \beta b - \frac{e^{-\beta c}}{2} \cos \beta c \right) + \frac{1-\nu}{E} r \frac{1}{t} q = \Delta R \quad \dots\dots\dots (A-19)$$

よって,

$$y = 0.962 \Delta R \quad (x=0)$$

$$y = 0.937 \Delta R \quad \left(x = \frac{l}{2}\right) \quad \dots\dots\dots (A-20)$$

本モデルによれば, 炉心支持板の膨張は拘束のないときに比べて, 最大 7% 程度抑えられることになる。

ところで, Fig.A.5(a) に示されるように炉心支持板自体, 高圧プレナム部と低圧プレナム部では構造材の厚みが大きく異なる。このため, 冷却材の温度変化が大きいときには熱容量の差により, 支持板内部で拘束が生じることになる。そこで次に, Fig.A.5(b) のように高圧プレナム部を円板 (半径 $r_0 + \Delta R$) に, 低圧プレナム部を中空円筒 (内半径 r_0 , 外半径 r_1) と仮定して, 前モデル同様はめ込み問題に帰着し膨張量を評価してみる。

Fig.A.5(b) において, $p_1 h_1 = p_0 h_0$, また, 簡単化のため低圧プレナム部の膨張と炉容器の相互作用を無視し $p_2 = 0$ とすると, (A-13) 式, (A-14) 式より,

$$\frac{1-\nu}{E} r_0 p_0 + \frac{1+\nu}{E} \frac{r_0 p_0}{r_1^2 - r_0^2} \left\{ \frac{1-\nu}{1+\nu} r_0^2 \frac{h_0}{h_1} + r_1^2 \frac{h_0}{h_1} \right\} = \Delta R \quad \dots\dots\dots (A-21)$$

ここで

$$r_0 = 1.839 \text{ m}$$

$$r_1 = 3.15 \text{ m}$$

$$h_1 = 0.256 \text{ m}$$

$$h_2 = 0.05 \text{ m}$$

およびTable A.1の数値を代入することにより

$$U_0 = -0.614R \dots\dots\dots (A-22)$$

が得られる。これは低圧プレナム部の熱膨張が全くないという極端な仮定をした場合、自由膨張に比べて伸びは約6割抑えられることになる。

以上2つのモデルによる検討より、炉心支持板膨張効果の計算においては、膨張量の補正係数として0.5を採用する。

Table A.1 パラメータおよび物性値

原子炉容器半径	$r = 3.5 \text{ (m)}$
原子炉容器肉厚	$h = 0.05 \text{ (m)}$
炉心支持板板厚	$t = 0.265 \text{ (m)}$
ヤング率	$E = 1.94 \times 10^{11} \text{ (Pa)}$
ポアソン比	$\nu = 0.3$
曲げ剛性	$E I_z = 2.22 \times 10^6 \text{ (Nm)}$

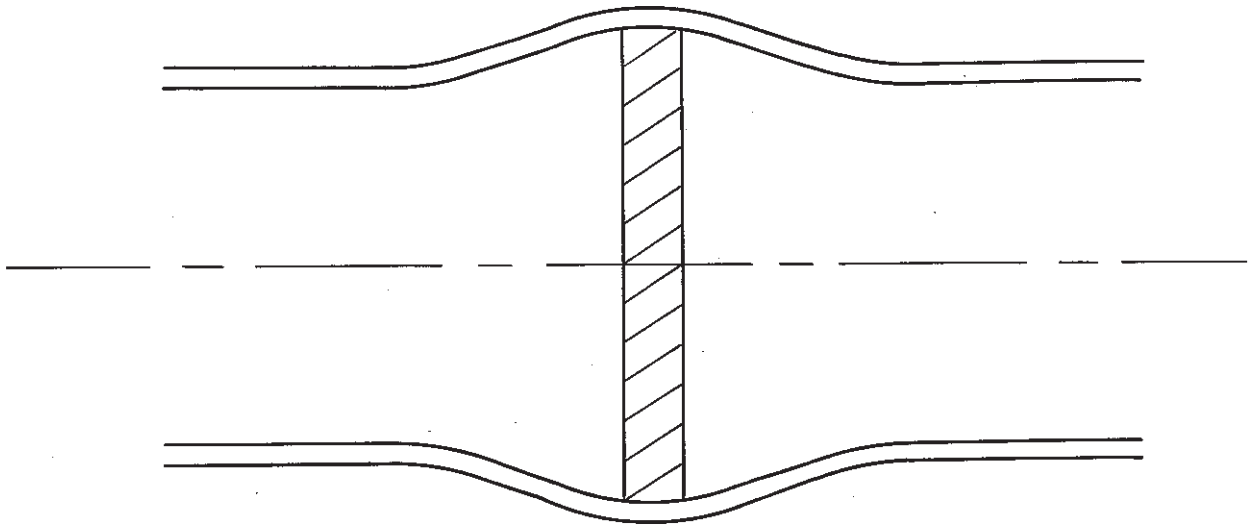


Fig. A.1 原子炉容器と炉心支持板のモデル化

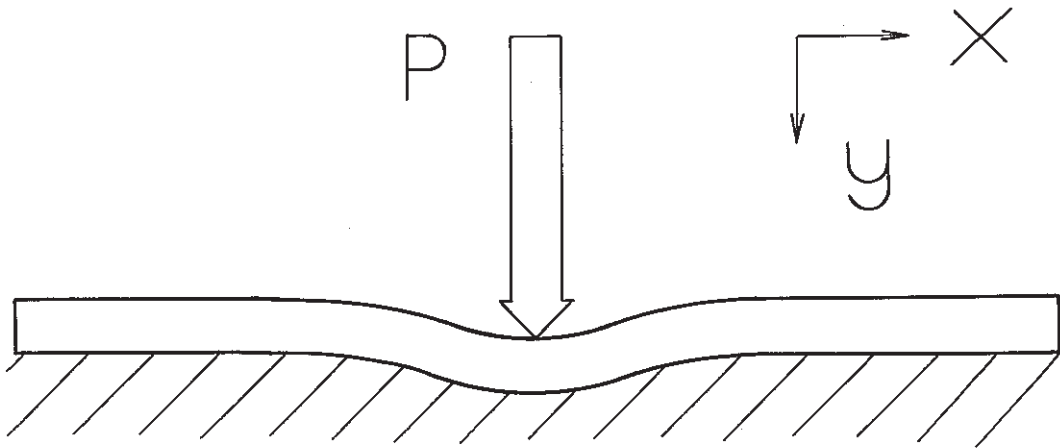


Fig. A.2 点荷重のかかるはり

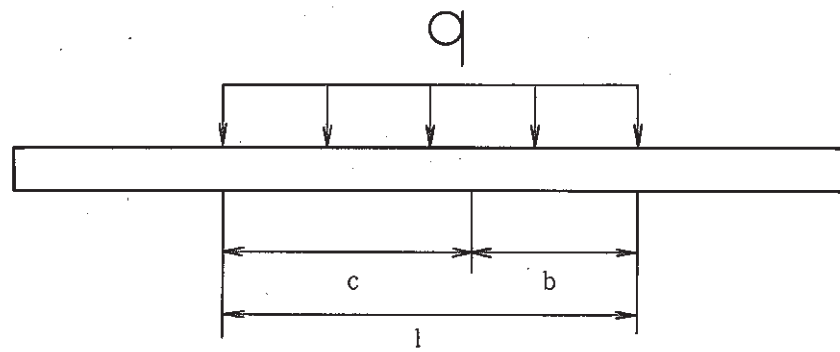


Fig. A. 3 等分布荷重のかかるはり

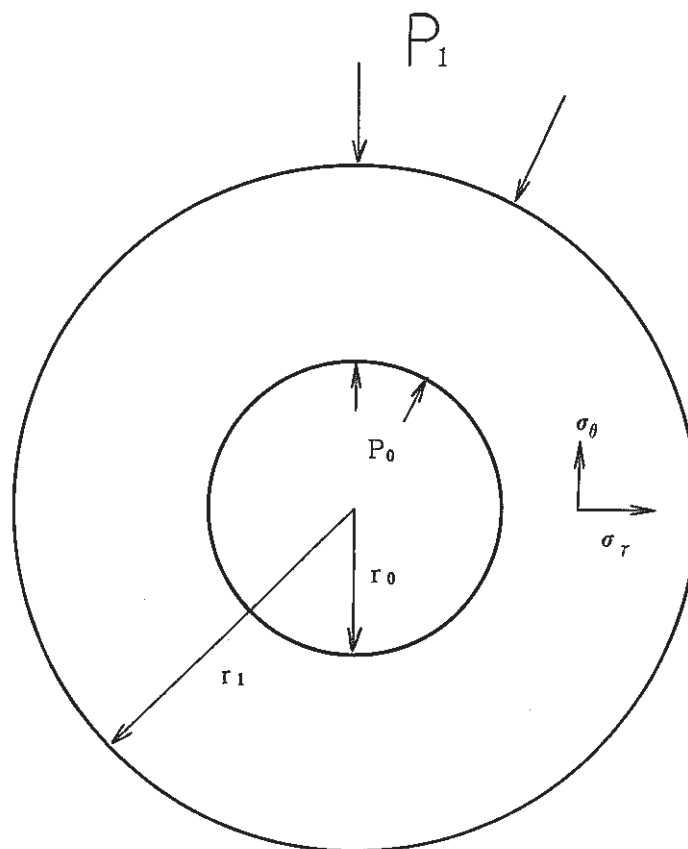


Fig. A. 4 中空円筒

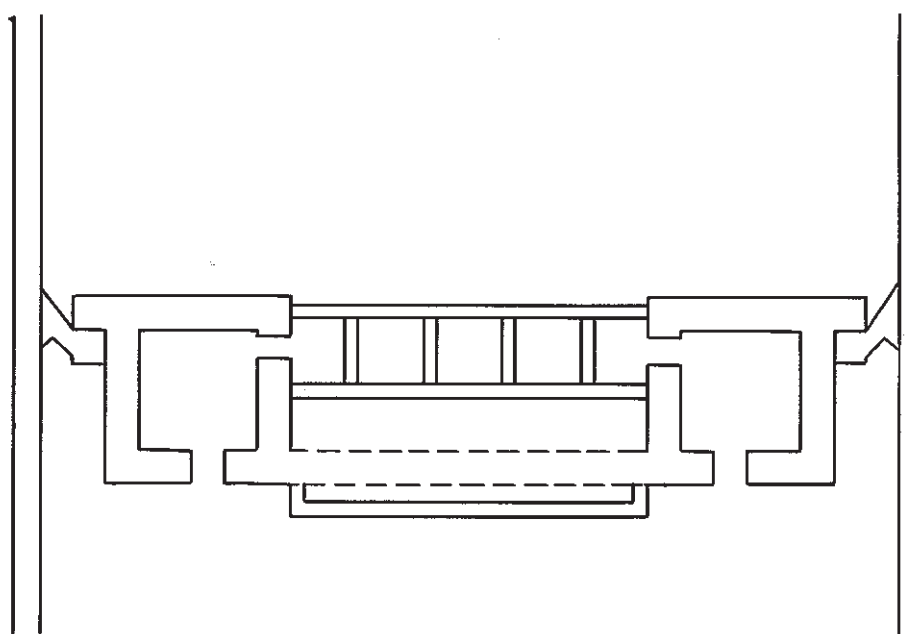


Fig. A.5(a) 炉心支持板概略図

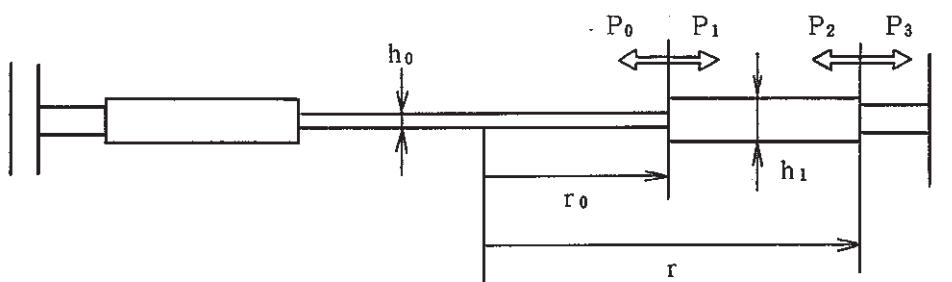


Fig. A.5(b) 炉心支持板モデル図