

“Mimir-N2”による「常陽」安全特性試験解析
(研究報告書)

2001年3月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4-49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184

Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2001

"Mimir-N2"による「常陽」安全特性試験解析 (研究報告書)

吉田 昌宏¹⁾、黒羽 隆也²⁾

要 旨

高速実験炉「常陽」では、高速増殖炉の固有安全性実証を目的とした安全特性試験の実施に関する研究を行っている。本研究に用いるプラント動特性解析コードとしては、「常陽」用に開発した"Mimir-N2"を採用し、MK-II炉心で実施した運転特性試験等から得られる情報を基に、コードの整備・検証を行ってきた。

安全特性試験の検討を行う上で重要なフィードバック反応度の検討として、「常陽」で観測される出力係数の燃焼依存性に着目し、これを燃焼に伴う燃料膨張反応度の変化によるものと仮定して燃料膨張反応度に燃焼依存性を考慮した。その結果、ステップ応答試験におけるステップ投入直後の核計装応答、燃料集合体出口温度及び一次冷却材が一巡した後の炉心支持板膨張反応度によるプラント状態の変動などを良く模擬できることが確認できた。また、「常陽」で開発した炉心湾曲反応度解析システムによる解析結果を入力として与えることにより、炉心湾曲反応度を取扱う機能を"Mimir-N2"に追加した。

以上により整備した"Mimir-N2"を用いて、MK-III炉心においてATWS模擬試験を実施した場合の予測解析を行った。その結果、反応度効果としては小さいが、原子炉出力状態によって変動する可能性のある炉心湾曲反応度に関しては、その挙動を把握しておくことが試験計画策定上重要であることがわかった。

本報告書の内容には、原子力システム株式会社が核燃料サイクル開発機構（機構担当課室：実験炉部 技術課）との契約により実施した業務成果に関するものを含み、核燃料サイクル開発機構が取りまとめたものである。

- 1) 核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター 照射施設運転管理センター 実験炉部 技術課
- 2) 原子力システム株式会社

JNC TN9400 2001-051
March, 2001

Joyo ATWS test analysis by Mimir-N2

YOSHIDA Akihiro¹⁾, KUROHA Takaya²⁾

ABSTRACT

The study on the passive safety test by using the Experimental Fast Reactor Joyo was performed to demonstrate the inherent safety of fast breeder reactors. An analysis code: Mimir-N2, which has been developed to analyze Joyo plant kinetics, was selected as a standard code for this study. In order to increase the reliability of the calculation, Mimir-N2 code was adjusted based on the data obtained through several plant characteristics tests carried out in Joyo.

Throughout an operational data obtained in Joyo, it is supposed that the burn-up dependency observed on the power reactivity coefficient might be coming from the reactivity shift caused by a depression of a thermal expansion of fuel pellet. Based on the relationship between the measured power reactivity coefficient and the core averaged burn-up, the burn-up dependency mentioned above was estimated and introduced to Mimir-N2. As a result, calculated core and plant dynamics during the step reactivity response test, such as the response of the power range neutron monitor and the coolant temperature at the core inlet / outlet, corresponded with the measured value. Especially, it was confirmed that Mimir-N2 can simulate the perturbation caused by the thermal expansion of the core support plate. In addition, Mimir-N2 was modified to be enable to take into account for the core bowing reactivity, which is calculated by the core bowing reactivity analysis system developed for Joyo.

The preliminary analysis of the plant dynamics during the ATWS events in MK-III core were carried out by using modified Mimir-N2. As a result, it was confirmed that the core bowing reactivity should not be neglected because it sometimes shows positive feedback characteristics.

1) Reactor Technology Section, Experimental Reactor Division, O-arai Engineering Center, JNC
2) Nuclear Energy System Inc.

目 次

| | |
|----------------------------|----|
| 1. 緒 言 | 1 |
| 2. "Mimir-N2"の概要と整備 | 2 |
| 2.1 "Mimir-N2"の概要 | 2 |
| 2.2 解析モデルの整備 | 2 |
| 3. ステップ応答試験解析 | 23 |
| 3.1 ステップ応答試験の概要 | 23 |
| 3.2 解析結果 | 23 |
| 4. MK-III炉心の安全特性試験解析 | 27 |
| 4.1 目的及び方法 | 27 |
| 4.2 解析結果 | 27 |
| 5. 結 言 | 31 |
| 参考文献 | 32 |

表リスト

| | |
|-------------------------------------|----|
| 表 2.2.1 MK-II第32サイクル炉心流量配分計算結果 | 8 |
| 表 2.2.2 MK-II第34サイクル炉心流量配分計算結果 | 9 |
| 表 2.2.3 エネルギー群構造 | 10 |
| 表 2.2.4 MK-II第32サイクル炉心温度係数 | 11 |
| 表 2.2.5 MK-II第35サイクル炉心温度係数 | 12 |
| 表 2.2.6 MK-III標準平衡炉心温度係数 | 13 |
| 表 2.2.7 MK-III標準平衡炉心ドップラ係数 | 14 |
| 表 2.2.8 MK-II炉心の30-100MW間平均出力係数測定結果 | 15 |

図リスト

| | |
|--|----|
| 図 2.1.1 "Mimir-N2"計算モデル全体概要 | 16 |
| 図 2.2.1 冷却材流量配分計算モデル | 17 |
| 図 2.2.2 温度係数計算モデル | 18 |
| 図 2.2.3 燃料膨張反応度の燃焼依存性概念図 | 19 |
| 図 2.2.4 「常陽」MK-II第16~31サイクル炉心の出力係数 | 20 |
| 図 2.2.5 燃料と制御棒の相対変位反応度概念図 | 21 |
| 図 2.2.6 "Mimir-N2"のフィードバック反応度計算モデル | 22 |
| 図 3.2.1 第33サイクルステップ応答試験結果と"Mimir-N2"の比較 (その1 反応度) | 24 |
| 図 3.2.2 第33サイクルステップ応答試験結果と"Mimir-N2"の比較 (その2 核計装応答と集合体出口温度) | 25 |
| 図 3.2.3 第33サイクルステップ応答試験結果と"Mimir-N2"の比較 (その3 原子炉出入口温度) | 26 |
| 図 4.2.1 定格出力からのUTOP模擬試験予測解析結果 | 29 |
| 図 4.2.2 部分出力からのUTOP模擬試験予測解析結果 | 30 |

1. 緒 言

高速実験炉「常陽」では、高速炉の固有安全特性を実証する観点から、設計条件を超える過渡が発生した場合にも、原子炉プラントの安全性が確保できることを示す安全特性試験の実施に関する研究を進めている。その一環として、これまで、フィードバック反応度の評価精度の向上のための検討、プラントの動特性解析コードの整備及び安全特性試験の予備解析等を行ってきた。

上記研究に使用するプラント動特性解析コードとしては、「常陽」で開発を進めてきた "Mimir-N2"を採用することとし、MK-IIの各サイクルの炉心で実施した運転特性試験データを基に、以下に示す整備・検証作業を行った。

- ・ ステップ応答試験に着目したフィードバック反応度計算部分の検討
- ・ フィードバック反応度計算機能の追加

さらに、上記作業を通じ整備した "Mimir-N2"を用いてMK-III炉心における安全特性試験の予測解析を行った。

2. "Mimir-N2"の概要と整備

ここでは、「常陽」のプラント動特性解析コード "Mimir-N2" の概要とこれまでに行った整備作業について述べる。

2.1 "Mimir-N2"の概要

"Mimir-N2"は、高速実験炉「常陽」のプラント動特性解析用に開発されたコードであり、これまで、MK-I、MK-II炉心の設計や自然循環試験の評価等に用いられてきた¹⁾。

"Mimir-N2"では、「常陽」の全プラント（炉心、一次冷却系及び二次冷却系）をモデル化し、冷却材ナトリウムを一次元非圧縮性流体として取扱い、差分法に基づき、定常及び非定常の一次元熱流力解析を行う。"Mimir-N2"の計算モデルの全体概要を図2.1.1に示す。

2.2 解析モデルの整備

2.2.1 流量配分の設定

"Mimir-N2"では、フローネットワーク解析により炉内の冷却材流量配分を求めている。標準的なMK-II炉心用の流量配分計算モデルの例を図2.2.1に示す。図2.2.1に示すように、"Mimir-N2"では、313体の炉心構成要素内部を除く原子炉容器内の冷却材流路を統合し、バイパスとしている。バイパスには、具体的には、燃料貯蔵ラック、炉心構成要素と炉心構造物の勘合部からの漏れ及び点在するガス抜孔等が含まれる。"Mimir-N2"では、任意の炉心の解析を行う場合、各炉心構成要素の圧力損失係数を入力し、計算される流量配分が目標値と一致するよう、バイパス部の圧損を調整する。

本報告書では、MK-II炉心、移行炉心及びMK-III炉心を計算対象とするが、MK-II炉心については、性能試験で実施した炉内冷却材流量分布測定試験結果に基づきバイパスの圧損係数を調整した。圧損の異なるMK-II炉心燃料集合体とMK-III炉心燃料集合体が混在する移行炉心については、「常陽」の運転監視コード "MAGI"²⁾による流配計算結果、MK-III炉心については設計計算結果³⁾と一致するよう、バイパスの圧損係数を調整した。例として、MK-II炉心にMK-III炉心燃料5体

を装荷した「常陽」第32サイクル炉心と15体のMK-III燃料を装荷した第34サイクル炉心の流量配分計算結果を表2.2.1と2.2.2に示す。ここで、"Mimir-N2"と" MAGI"では、使用している圧損係数の違い ("MAGI"では集合体単位の圧損係数を入力しているが、"Mimir-N2"では、過渡時の計算用にエントランスノズル部とバンドル部にわけた圧損係数を入力している)により、特に炉心第4列と5列の流量に系統的に差が生じることがわかった。そのため、ここでは、高压プレナム流量が "MAGI"の値と一致するよう、"Mimir-N2"のバイパスの圧損係数を調整した。

2.2.2 フィードバック反応度

"Mimir-N2"では、炉心部について一点炉近似の動特性計算を行っており、フィードバック反応度成分としてドップラ反応度、燃料・構造材・冷却材・炉心支持板膨張反応度を扱っている。本報告書に記載したMK-II、MK-III炉心の解析では、これらフィードバック反応度を、「常陽」の標準的な設計計算手法⁴⁾に基づく2次元RZ摂動計算によるものに統一した。

「常陽」の設計手法に基づく反応度係数計算手法を図2.2.2に示す。計算では、炉定数として核データライブラリJENDL-2に基づく70群の炉定数セットJFS-3-J2を使用し、7群または18群の実効断面積を作成する。エネルギー群構造を表2.2.3に示す。ここで、ドップラ反応度と燃料、構造材及び冷却材の膨張に伴う反応度の算出に用いる密度係数は、一次摂動理論に基づき、計算コード"HANYO-PERT"⁴⁾の二次元RZ体系を用いた18群拡散計算により求めた。炉心支持板膨張係数の算出に使用する径方向熱膨張に伴う形状係数は、2次元拡散コード"2DBURN"⁴⁾の直接計算(7群)により求めた。

移行炉心第32、35サイクル炉心及びMK-III標準平衡炉心の温度係数を表2.2.4～6にそれぞれ示す。なお、"Mimir-N2"に入力する場合、炉心支持板膨張反応度については、表2.2.4～6に示す炉心平均の値を用い、その他のフィードバック反応度成分については、二次元RZ体系による値を図2.2.1に示す流路毎に与えた。例として、MK-III標準平衡炉心のドップラ係数データを表2.2.7に示す。

[ドップラ反応度]

設計計算手法に基づくドップラ反応度に関しては、米国SEFOR炉のドップラ反応度実験解析による設計計算のC/E値が0.94±0.13であるため³⁾、"Mimir-N2"で

はドップラ反応度にE/C補正（補正係数：1.064）を施すこととした。

[燃料膨張反応度]

"Mimir-N2"に関しては、「常陽」で実施しているステップ応答試験に着目し、計算値と実測値を比較することにより検証を進めている。これまでの検討で、MK-II炉心で測定した出力係数と炉心平均燃焼度の関係を一次式にフィッティングし、その傾きから設定した燃焼依存性を個々の燃料集合体の燃料膨張反応度に考慮することにより、"Mimir-N2"によるステップ応答試験解析結果が実測とよく一致することを確認した³⁾。

ここで、MK-II炉心第16サイクル以降のMK-II炉心の30~100MW間平均出力係数測定結果を表2.2.8に示す。MK-II炉心では、運転サイクル初期（BOC）と末期（EOC）に定常的に出力係数を測定しているが、第27、31、34及び35サイクル炉心では、サイクル運転期間中（MOC）に出力係数を測定した。表2.2.8より、MOC-EOC間の単位燃焼度当たりの出力係数の変化割合（以下、出力係数変化率）は、すべて最大でもBOC-MOC間の1/2以下であることがわかる。また、新燃料装荷体数がゼロであった第29、29'サイクルでは、第29サイクルBOCから29'サイクル終了までの間の出力係数変化率は、8E-08(%Δk/kk'/MW/MWd/t)とMOC-EOC間の変化率に近く、新燃料が3体と少なかった第28サイクルのBOC-EOC間出力係数変化率も8E-08(%Δk/kk'/MW/MWd/t)とMOC-EOC間に近い値であった。

これは、燃料膨張反応度の燃焼依存性の原因として考えられる燃料組織変化やクラックの発生が、新燃料として装荷された直後の出力上昇時に急激に進展することによるものと考えられる。

現状のデータから、BOCの出力上昇時の燃料膨張反応度を予測するのは困難であるため、"Mimir-N2"による動特性解析は、当面、対象をMOCとEOCに限定することとし、あわせて燃料膨張反応度に考慮する燃焼依存性の式を見直すこととした。見直し後の燃焼依存性は、図2.2.3に示すように、初期に燃料膨張反応度が急激に低下した後、一定の割合で低下するものとする。

ここで、「常陽」MK-II炉心のうち、炉心燃料の仕様と交換パターンをほとんど同じとして構成した第16~31サイクル炉心のBOCとEOCの30~100MW間平均出力係数： C_{core} (%Δk/kk'/MW)と炉心平均燃焼度： B_{core} (MWd/t)の関係を図2.2.4に

示す。 C_{core} と B_{core} の関係を最小二乗法を用いて一次式にフィッティングした結果は以下のとおりである。

$$\text{BOC : C}_{\text{core}} = -7.61\text{E-}03 + 1.44\text{E-}07 \times B_{\text{core}} \quad \dots \quad (2.1)$$

$$\text{EOC : } C_{\text{core}} = -5.27E-03 + 7.81E-08 \times B_{\text{core}} \quad \dots \quad (2.2)$$

まず、図2.2.3に基づき、(2.1)と(2.2)式から求められる0MWd/t相当の燃料膨張反応度を基に、燃料膨張反応度を0MWd/tで瞬間的に低下させる時の低下割合を求める。ここで、2.2.2に示した設計計算による出力係数のうち、燃料膨張反応度を除く成分（ドップラ反応度、冷却材・構造材膨張反応度の合計）は、 $-1.9E-03(\% \Delta k/kk'/MW)$ であり、(2.1)、(2.2)式のy切片からこの値を引き、その比を求める
と0.59となる ($[-5.27E-03 + 1.9E-03] / [-7.61E-03 + 1.9E-03] = 0.59$)。この比で
低下した後、燃料膨張反応度は、(2.2)式の傾きに沿って低下するものとする。

以上より、"Mimir-N2"では、計算される燃料膨張反応度に下記の式で与えられる相対比を乗じることとする。

$$k = 0.59 - 1.4E-05 \times B_{S/A} \quad \dots \quad (2.3)$$

ここで、 $B_{\text{S/A}}$ は集合体平均燃焼度 (MWd/t) である。

2.2.3 フィードバック反応度計算機能の追加

[制御棒と燃料の軸方向相対変位による反応度]

制御棒駆動機構の延長管、原子炉容器及び燃料ペレットは、温度変化による膨張・収縮により、燃料と制御棒の軸方向相対位置を変化させ、反応度投入の原因となる。上記反応度の発生概念図を図2.2.5に示す。このうち、炉容器は熱変位の次元数が大きく、燃料ペレットは変位量が小さいが、制御棒駆動機構の延長管は、時定数が小さく、状況によっては比較的大きな反応度を与えることから、燃料と制御棒の軸方向相対変位による反応度計算モデルを "Mimir-N2" に組み込んだ。モデルでは、制御棒駆動機構延長管、原子炉容器及び燃料の熱変位から制御棒と燃料の相対位置の時間推移を求め、これと予め入力しておいた制御棒引抜き位置と校正曲線から投入される反応度を計算する。

制御棒駆動機構延長管については、「常陽」の6体の制御棒に対し、それぞれの周囲6集合体の集合体出口温度計算値の変化量とステンレス鋼の熱膨張率： $16.25 \times 10^{-6} K^{-1}$ から軸方向変位量を求める。また、延長管部の温度変化に対する一次遅れ

時定数： τ_{CR} をについては、制御棒駆動機構を上部案内管、外側・内側延長管及び加速管からなる多重円筒とし、下式より計算した。

$$= C_p M / (U A)$$

ここで、 C_p : 管の比熱

M : 管の重量

U : 管とNaの熱貫流率

A : 管とNaの伝熱面積

である。加速管内部のNaをスタグナントとしたところ、 τ_{CR} は30(s)となった。

炉容器については、原子炉出口温度と入口温度の平均値から、前述の制御棒駆動機構と同様に熱変位量を求めた。一次遅れ時定数については、3600φの炉容器内側の熱遮へい板（3層、5mm間隔、肉厚10mm）を考慮し、制御棒駆動機構と同様に算出した結果、 τ_{CR} は620(s)となった。

燃料ペレットについては、"Mimir-N2"で計算される燃料温度に対し、時間遅れなく変位することとするが、2.2.2の知見より、変位量は、燃料ペレットの熱膨張率： $[8.06 + 4.08 \times 10^{-3}T + 2.33 \times 10^{-7}T^2] \times 10^{-6}$ （出典：GEAP-13582, NUMEC-2389-9）と温度変化量の積に燃焼依存性を考慮するために算出した(2.3)式による係数kを乗じることとした。

[流量反応度係数]

これまで発生メカニズムが解明されていなかった流量反応度係数については、流量変化時の一次冷却材の流体圧力差によって生じる炉心支持構造物の変位により、炉心支持板に拘束される燃料集合体が軸方向に変位する現象で、投入される反応度の約20～50%が説明できることがわかったため^{6,7)}、"Mimir-N2"の反応度計算モデルに追加することとした。ただし、前述のとおり、上記モデルによる反応度計算値は実測値を過小評価することから、当面、MK-II炉心での流量反応度係数測定値の $-2 \times 10^{-4} (\% \Delta k / kk' / \% \text{flow})^7$ を用いて投入反応度を計算することとした。

2.2.4 炉心湾曲反応度計算機能の追加

炉心湾曲反応度に関しては、解析方法の信頼性が確認されてはいないが、これまでの検討で、定格出力付近の微小な出力範囲であれば、「常陽」で観測される出力係数の出力依存性が、炉心湾曲反応度計算値から説明できることがわかった⁸⁾。これは、炉心構成要素の残留変位や熱変位により、炉心構成要素同士が拘束しあった

状態で出力が微小に変化した場合の炉心湾曲現象であれば、計算である程度再現できるためであると考えられる。

上記結果を踏まえ、原子炉出力と一次冷却材流量の比 (P/F) とパラメータとした"BEACON"による炉心湾曲計算結果を基に、"AURORA"を用いた炉心湾曲反応度解析を行い、P/Fと炉心湾曲反応度のテーブルデータを作成し、" Mimir-N2"に組み込んだ。

なお、MK-III炉心では、MK-II炉心と炉心が大きく変わらず、原子炉出口温度が同じであるため、集合体の湾曲挙動は大きく変わらないが、反射体領域の最外周にB4Cを装填した遮へい集合体が導入されるため、出力上昇に伴い、炉心構成要素が炉外側方向に変位した場合、遮へい集合体が炉心から遠ざかる効果が働き、燃料密度変化に伴う負の反応度を抑制する点が特徴的である。

2.2.3 ヒートバランスの見直し

"Mimir-N2"を用いて任意のMK-II炉心の静特性解析を行うと、瞬時にフィードバック反応度が働きプラント状態が変化するが、調査の結果、以下の2点がこの事象の主な原因であることがわかったため、見直しを行った。

- ① 中間熱交換器（以下、IHX）の定常状態計算結果
- ② カスケードモードの設定

①については、過去、実測データに基づき、IHXでの一次側と二次側の熱交換時の熱損失量（保温材への放熱量、一次側の無駄流量）を設定していたが、これが、現状のヒートバランスと整合していないことがわかった。②も同様、過去、実測データに基づき、原子炉容器出口Na温度に対するDHX出口Na温度の制御目標値を定めていた部分にずれが生じていた。なお、①、②とも、見直し量は、その量を定義する際に用いるIHX出入口温度等の差に換算すると熱電対の誤差の範囲で説明できる量であり、実際のIHXの性能（放熱量）や制御系の変動によるものではないと考えられる。

以上の見直しを行った"Mimir-N2"のフィードバック反応度計算モデルを図2.2.6に示す。

表 2.2.1 MK-II第32サイクル炉心流量配分計算結果

| 代表 チャンネル 番号 | 集合体種類 | 体数 | MIMIR-N2流量 (kg/s) | MAGI流量 (kg/s) | (MIMIR-N2)-(MAGI) (kg/s) |
|-----------------------|-------------|-----|----------------------|------------------|-----------------------------|
| 1 | 第0列炉心燃料 | 1 | 8.793 | 8.820 | -0.027 |
| 2 | 第1例 | 6 | 52.763 | 52.912 | -0.149 |
| 3 | 第2列 | 12 | 100.318 | 100.379 | -0.061 |
| 4 | 第3列 | 8 | 60.030 | 60.383 | -0.353 |
| 5 | 第4列 | 21 | 147.643 | 144.126 | 3.517 |
| 6 | 第5列 | 13 | 71.121 | 74.596 | -3.475 |
| 7 | C型特殊燃料 | 2 | 6.757 | 6.689 | 0.068 |
| 8 | B型試験用 | 1 | 3.378 | 3.143 | 0.235 |
| 9 | MK-Ⅲ炉心4列 | 3 | 23.128 | 22.977 | 0.151 |
| 10 | MK-Ⅲ炉心5列 | 2 | 13.538 | 13.460 | 0.078 |
| 高圧プレナム→上部プレナム 合計流量 | | | 487.467 | 487.485 | -0.018 |
| 11 | 内側反射体5列 | 10 | 1.589 | 1.384 | 0.205 |
| 12 | 内側反射体6列 | 28 | 4.444 | 3.875 | 0.568 |
| 13 | 外側反射体A | 144 | 22.304 | 20.596 | 1.708 |
| 14 | 外側反射体B | 48 | 6.002 | 5.180 | 0.821 |
| 15 | CMIR+MARICO | 2 | 0.906 | 0.921 | -0.015 |
| 16 | AMIR+SMIR | 6 | 2.714 | 2.192 | 0.522 |
| 17 | 制御棒 | 6 | 13.970 | 16.332 | -2.362 |
| 低圧プレナム→上部プレナム 合計流量 | | | 51.917 | 50.480 | 1.436 |
| | 合計 | 313 | 539.384 | 537.965 | 1.418 |

| | | |
|-----------------|--------|----------|
| 下部プレナム入口流量 | 598.48 | 604.10 |
| 高圧プレナム→上部プレナム流量 | 487.47 | 487.49 |
| 低圧プレナム→上部プレナム流量 | 51.92 | 50.48 |
| 炉心バイパス流量 | 59.10 | 66.13 *1 |

*1 604.10 - (487.49+50.48)

表 2.2.2 MK-II第34サイクル炉心流量配分計算結果

| 代表 チャンネル 番号 | 集合体種類 | 体数 | MIMIR-N2流量 (kg/s) | MAGI流量 (kg/s) | (MIMIR-N2)-(MAGI) (kg/s) |
|-----------------------|------------|-----|----------------------|------------------|-----------------------------|
| 1 | 第1例 | 6 | 48.602 | 48.843 | -0.241 |
| 2 | 第2列 | 12 | 92.479 | 92.734 | -0.255 |
| 3 | 第3列 | 10 | 69.234 | 69.798 | -0.564 |
| 4 | 第4列 | 21 | 136.380 | 133.481 | 2.899 |
| 5 | 第5列 | 9 | 45.508 | 47.810 | -2.302 |
| 6 | C型特殊燃料 | 1 | 3.133 | 3.469 | -0.336 |
| 7 | B型試験用 | 1 | 3.132 | 2.734 | 0.398 |
| 8 | MK-III炉心4列 | 3 | 21.339 | 21.239 | 0.100 |
| 9 | MK-III炉心5列 | 12 | 75.034 | 74.758 | 0.276 |
| 高圧プレナム→上部プレナム 合計流量 | | | 494.842 | 494.866 | -0.024 |
| 10 | サーベランス用反射体 | 1 | 0.154 | 0.259 | -0.105 |
| 11 | 内側反射体5列 | 7 | 1.071 | 0.940 | 0.131 |
| 12 | 内側反射体6列 | 29 | 4.431 | 3.895 | 0.536 |
| 13 | 外側反射体A | 144 | 21.449 | 19.974 | 1.475 |
| 14 | 外側反射体B | 48 | 5.729 | 4.223 | 1.505 |
| 15 | CMIR | 1 | 0.436 | 0.256 | 0.180 |
| 16 | AMIR+SMIR | 2 | 0.870 | 0.708 | 0.162 |
| 17 | 制御棒 | 6 | 13.406 | 15.822 | -2.416 |
| 低圧プレナム→上部プレナム 合計流量 | | | 47.545 | 45.819 | 1.726 |
| 合計 | | 313 | 542.387 | 540.685 | 1.702 |

| | | |
|-----------------|--------|----------|
| 下部プレナム入口流量 | 598.49 | 603.20 |
| 高圧プレナム→上部プレナム流量 | 494.84 | 494.87 |
| 低圧プレナム→上部プレナム流量 | 47.55 | 45.82 |
| 炉心バイパス流量 | 56.10 | 62.52 *1 |

*1 603.20 - (494.87+45.82)

表2.2.3 エネルギー群構造

| 群構造 | | 境界エネルギー(eV) | |
|-----|-----|-------------|------------|
| 7群 | 18群 | 70群 | |
| | | 上限 | 下限 |
| 1 | 1 | 1.0000E+07 | 7.7880E+06 |
| | | 7.7880E+06 | 6.0653E+06 |
| | 2 | 6.0653E+06 | 4.7237E+06 |
| | | 4.7237E+06 | 3.6788E+06 |
| | 3 | 3.6788E+06 | 2.8650E+06 |
| | | 2.8650E+06 | 2.2313E+06 |
| | 4 | 2.2313E+06 | 1.7377E+06 |
| | | 1.7377E+06 | 1.3534E+06 |
| 2 | 5 | 1.3534E+06 | 1.0540E+06 |
| | | 1.0540E+06 | 8.2085E+05 |
| | 6 | 8.2085E+05 | 6.3928E+05 |
| | | 6.3928E+05 | 4.9787E+05 |
| | | 4.9787E+05 | 3.8774E+05 |
| 3 | 7 | 3.8774E+05 | 3.0197E+05 |
| | | 3.0197E+05 | 2.3518E+05 |
| | | 2.3518E+05 | 1.8316E+05 |
| | 8 | 1.8316E+05 | 1.4264E+05 |
| | | 1.4264E+05 | 1.1109E+05 |
| | 19 | 1.1109E+05 | 8.6517E+04 |
| | 9 | 8.6517E+04 | 6.7379E+04 |
| | | 6.7379E+04 | 5.2475E+04 |
| | | 5.2475E+04 | 4.0868E+04 |
| 4 | 10 | 4.0868E+04 | 3.1828E+04 |
| | | 3.1828E+04 | 2.4788E+04 |
| | | 2.4788E+04 | 1.9305E+04 |
| | 11 | 1.9305E+04 | 1.5034E+04 |
| | | 1.5034E+04 | 1.1709E+04 |
| | 28 | 1.1709E+04 | 9.1188E+03 |
| | 12 | 9.1188E+03 | 7.1017E+03 |
| | | 7.1017E+03 | 5.5308E+03 |
| | | 5.5308E+03 | 4.3074E+03 |
| 5 | 13 | 4.3074E+03 | 3.3546E+03 |
| | | 3.3546E+03 | 2.6126E+03 |
| | | 2.6126E+03 | 2.0347E+03 |
| | 14 | 2.0347E+03 | 1.5846E+03 |
| | | 1.5846E+03 | 1.2341E+03 |
| | 37 | 1.2341E+03 | 9.6112E+02 |

| 群構造 | | 境界エネルギー(eV) | |
|-----|-----|-------------|------------|
| 7群 | 18群 | 70群 | |
| | | 上限 | 下限 |
| 6 | 15 | 9.6112E+02 | 7.4852E+02 |
| | | 7.4852E+02 | 5.8295E+02 |
| | | 5.8295E+02 | 4.5400E+02 |
| | 16 | 4.5400E+02 | 3.5358E+02 |
| | | 3.5358E+02 | 2.7536E+02 |
| | | 3.5358E+02 | 2.1445E+02 |
| | 17 | 2.1445E+02 | 1.6702E+02 |
| | | 1.6702E+02 | 1.3007E+02 |
| | | 1.3007E+02 | 1.0130E+02 |
| | | 1.0130E+02 | 7.8893E+01 |
| 7 | 18 | 7.8893E+01 | 6.1442E+01 |
| | | 6.1442E+01 | 4.7851E+01 |
| | | 4.7851E+01 | 3.7267E+01 |
| | | 3.7267E+01 | 2.9023E+01 |
| | | 2.9023E+01 | 2.2603E+01 |
| | | 2.2603E+01 | 1.7603E+01 |
| | | 1.7603E+01 | 1.3710E+01 |
| | 18 | 1.3710E+01 | 1.0677E+01 |
| | | 1.0677E+01 | 8.3153E+00 |
| | | 8.3153E+00 | 6.4760E+00 |
| | | 6.4760E+00 | 5.0435E+00 |
| | | 5.0435E+00 | 3.9279E+00 |
| | | 3.9279E+00 | 3.0590E+00 |
| | | 3.0590E+00 | 2.3824E+00 |
| 8 | 18 | 2.3824E+00 | 1.8554E+00 |
| | | 1.8554E+00 | 1.4450E+00 |
| | | 1.4450E+00 | 1.1254E+00 |
| | | 1.1254E+00 | 8.7642E-01 |
| | | 8.7642E-01 | 6.8256E-01 |
| | | 6.8256E-01 | 5.3158E-01 |
| | | 5.3158E-01 | 4.1399E-01 |
| | 18 | 4.1399E-01 | 3.2242E-01 |
| | | 3.2242E-01 | 1.0000E-05 |

表 2.2.4 MK-II第32サイクル炉心温度係数

 $(\times 10^{-6} (\Delta k/k') / {}^\circ C)$

| 炉心状態 | 項目 | 領域 | | | | 全炉心 合計 |
|-------|----------|--------|------------|--------------|-------|-----------|
| | | 炉心 | 径方向 反射体 | 上部軸方 向反射体 | 下部空間部 | |
| 100MW | 燃料ペレット膨張 | - 4.13 | | | | - 4.13 |
| | 被覆管膨張 | - 1.21 | | | | - 1.21 |
| | ラッパー管膨張 | - 0.30 | -1.31 | -0.48 | -0.32 | - 2.40 |
| | 炉心支持板膨張 | -11.51 | -0.73 | -0.39 | -0.22 | -12.85 |
| | 冷却材膨張 | - 5.35 | -1.67 | -0.86 | -2.75 | -10.63 |
| | ドップラー効果 | - 1.39 | | | | - 1.39 |
| | 合 計 | -23.89 | -3.71 | -1.73 | -3.28 | -32.62 |
| 75MW | 燃料ペレット膨張 | - 3.85 | | | | - 3.85 |
| | 被覆管膨張 | - 1.21 | | | | - 1.21 |
| | ラッパー管膨張 | - 0.30 | -1.31 | -0.48 | -0.32 | - 2.39 |
| | 炉心支持板膨張 | -11.51 | -0.73 | -0.39 | -0.22 | -12.85 |
| | 冷却材膨張 | - 5.32 | -1.66 | -0.85 | -2.75 | -10.58 |
| | ドップラー効果 | - 1.60 | | | | - 1.60 |
| | 合 計 | -23.78 | -3.70 | -1.72 | -3.28 | -32.49 |
| 45MW | 燃料ペレット膨張 | - 3.49 | | | | - 3.49 |
| | 被覆管膨張 | - 1.20 | | | | - 1.20 |
| | ラッパー管膨張 | - 0.29 | -1.30 | -0.47 | -0.32 | - 2.39 |
| | 炉心支持板膨張 | -11.51 | -0.73 | -0.39 | -0.22 | -12.85 |
| | 冷却材膨張 | - 5.29 | -1.66 | -0.84 | -2.75 | -10.54 |
| | ドップラー効果 | - 1.98 | | | | - 1.98 |
| | 合 計 | -23.76 | -3.70 | -1.70 | -3.28 | -32.45 |
| 370°C | 燃料ペレット膨張 | - 2.99 | | | | - 2.99 |
| | 被覆管膨張 | - 1.19 | | | | - 1.19 |
| | ラッパー管膨張 | - 0.29 | -1.30 | -0.45 | -0.32 | - 2.37 |
| | 炉心支持板膨張 | -11.51 | -0.73 | -0.39 | -0.22 | -12.85 |
| | 冷却材膨張 | - 5.22 | -1.65 | -0.82 | -2.75 | -10.44 |
| | ドップラー効果 | - 3.00 | | | | - 3.00 |
| | 合 計 | -24.20 | -3.68 | -1.68 | -3.28 | -32.84 |

表 2.2.5 MK-II第35サイクル炉心温度係数

 $(\times 10^{-6} (\Delta k/k') / {}^\circ C)$

| 炉心状態 | 項目 | 領域 | | | | 全炉心 合計 |
|-------|----------|--------|------------|--------------|-------|-----------|
| | | 炉心 | 径方向 反射体 | 上部軸方 向反射体 | 下部空間部 | |
| 100MW | 燃料ペレット膨張 | - 3.90 | | | | - 3.90 |
| | 被覆管膨張 | - 0.99 | | | | - 0.99 |
| | ラッパー管膨張 | - 0.23 | -1.15 | -0.48 | -0.32 | - 2.18 |
| | 炉心支持板膨張 | -11.34 | -0.73 | -0.39 | -0.22 | -12.67 |
| | 冷却材膨張 | - 4.51 | -1.39 | -0.86 | -2.75 | - 9.51 |
| | ドップラー効果 | - 1.41 | | | | - 1.41 |
| | 合 計 | -22.36 | -3.27 | -1.73 | -3.28 | -30.65 |
| 75MW | 燃料ペレット膨張 | - 3.63 | | | | - 3.63 |
| | 被覆管膨張 | - 0.98 | | | | - 0.98 |
| | ラッパー管膨張 | - 0.23 | -1.15 | -0.48 | -0.32 | - 2.17 |
| | 炉心支持板膨張 | -11.34 | -0.73 | -0.39 | -0.22 | -12.67 |
| | 冷却材膨張 | - 4.48 | -1.39 | -0.85 | -2.75 | - 9.47 |
| | ドップラー効果 | - 1.62 | | | | - 1.62 |
| | 合 計 | -22.28 | -3.27 | -1.72 | -3.28 | -30.54 |
| 45MW | 燃料ペレット膨張 | - 3.30 | | | | - 3.30 |
| | 被覆管膨張 | - 0.98 | | | | - 0.98 |
| | ラッパー管膨張 | - 0.23 | -1.15 | -0.47 | -0.32 | - 2.16 |
| | 炉心支持板膨張 | -11.34 | -0.73 | -0.39 | -0.22 | -12.67 |
| | 冷却材膨張 | - 4.45 | -1.38 | -0.84 | -2.75 | - 9.42 |
| | ドップラー効果 | - 2.00 | | | | - 2.00 |
| | 合 計 | -22.29 | -3.26 | -1.70 | -3.28 | -30.54 |
| 370°C | 燃料ペレット膨張 | - 2.83 | | | | - 2.83 |
| | 被覆管膨張 | - 0.97 | | | | - 0.97 |
| | ラッパー管膨張 | - 0.23 | -1.14 | -0.46 | -0.32 | - 2.15 |
| | 炉心支持板膨張 | -11.34 | -0.73 | -0.39 | -0.22 | -12.67 |
| | 冷却材膨張 | - 4.40 | -1.37 | -0.82 | -2.75 | - 9.34 |
| | ドップラー効果 | - 3.03 | | | | - 3.03 |
| | 合 計 | -22.78 | -3.25 | -1.68 | -3.28 | -30.99 |

表 2.2.6 MK-III標準平衡炉心温度係数

[$\times 10^{-6} (\Delta k/kk')/^\circ C$]

| 炉心状態 | 項目 | 領域 | | | | 全炉心 合計 |
|--------|----------|-----------|------------|--------------|--------|-----------|
| | | 炉心 反射体 | 径方向 反射体 | 上部軸方向 反射体 | 下部空間部 | |
| 140 MW | 燃料ペレット膨張 | - 3.80 | | | | - 3.80 |
| | 被覆管膨張 | - 0.97 | | | | - 0.97 |
| | ラッパー管膨張 | - 0.22 | - 0.97 | - 0.61 | - 0.35 | - 2.16 |
| | 炉心支持板膨張 | -11.63 | - 0.69 | - 0.47 | - 0.34 | -13.12 |
| | 冷却材膨張 | - 4.48 | - 1.11 | - 1.15 | - 2.46 | - 9.20 |
| | ドップラー効果 | - 1.29 | | | | - 1.29 |
| | 合 計 | -22.39 | - 2.77 | - 2.24 | - 3.15 | - 30.54 |
| 100 MW | 燃料ペレット膨張 | - 3.42 | | | | - 3.42 |
| | 被覆管膨張 | - 0.97 | | | | - 0.97 |
| | ラッパー管膨張 | - 0.22 | - 0.97 | - 0.61 | - 0.35 | - 2.15 |
| | 炉心支持板膨張 | -11.63 | - 0.69 | - 0.47 | - 0.34 | -13.12 |
| | 冷却材膨張 | - 4.45 | - 1.10 | - 1.13 | - 2.46 | - 9.14 |
| | ドップラー効果 | - 1.58 | | | | - 1.58 |
| | 合 計 | -22.26 | - 2.76 | - 2.21 | - 3.15 | - 30.38 |
| 60 MW | 燃料ペレット膨張 | - 3.15 | | | | - 3.15 |
| | 被覆管膨張 | - 0.96 | | | | - 0.96 |
| | ラッパー管膨張 | - 0.22 | - 0.97 | - 0.60 | - 0.35 | - 2.14 |
| | 炉心支持板膨張 | -11.63 | - 0.69 | - 0.47 | - 0.34 | -13.12 |
| | 冷却材膨張 | - 4.42 | - 1.10 | - 1.12 | - 2.46 | - 9.09 |
| | ドップラー効果 | - 1.88 | | | | - 1.88 |
| | 合 計 | -22.25 | - 2.75 | - 2.19 | - 3.15 | - 30.35 |
| 350°C | 燃料ペレット膨張 | - 2.61 | | | | - 2.61 |
| | 被覆管膨張 | - 0.95 | | | | - 0.95 |
| | ラッパー管膨張 | - 0.22 | - 0.96 | - 0.59 | - 0.35 | - 2.13 |
| | 炉心支持板膨張 | -11.63 | - 0.69 | - 0.47 | - 0.34 | -13.12 |
| | 冷却材膨張 | - 4.37 | - 1.09 | - 1.09 | - 2.46 | - 9.01 |
| | ドップラー効果 | - 3.11 | | | | - 3.11 |
| | 合 計 | -22.88 | - 2.74 | - 2.16 | - 3.15 | - 30.93 |
| 250°C | 燃料ペレット膨張 | - 2.48 | | | | - 2.48 |
| | 被覆管膨張 | - 0.93 | | | | - 0.93 |
| | ラッパー管膨張 | - 0.21 | - 0.94 | - 0.58 | - 0.35 | - 2.08 |
| | 炉心支持板膨張 | -11.39 | - 0.67 | - 0.46 | - 0.33 | -12.85 |
| | 冷却材膨張 | - 4.23 | - 1.06 | - 1.06 | - 2.38 | - 8.72 |
| | ドップラー効果 | - 3.71 | | | | - 3.71 |
| | 合 計 | -22.94 | - 2.67 | - 2.06 | - 3.06 | - 30.77 |

表 2.2.7 MK-III標準平衡炉心ドップラ係数

$$\left[T \frac{dk}{dT} \right]$$

| | TYPE-B | 第1列 | | TYPE-C | 第2列 | | 第3列 (内側) | 第3列 (外側) | 第4列 | | 第5列 |
|---------------|--------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|------------|---|-----|
| | | J/I | 1 | | 2 | 3 | | | 4 | 5 | |
| 上部 インシュレータ | 1 | -1.387E-06 | -3.742E-06 | -3.791E-06 | -1.195E-05 | -4.953E-06 | -5.761E-06 | -1.502E-05 | -1.381E-05 | | |
| | 2 | -2.630E-06 | -2.414E-05 | -1.384E-05 | -8.004E-05 | -2.586E-05 | -3.836E-05 | -9.375E-05 | -1.191E-04 | | |
| | 3 | -2.024E-06 | -2.092E-05 | -1.142E-05 | -7.147E-05 | -2.333E-05 | -3.456E-05 | -8.408E-05 | -1.165E-04 | | |
| | 4 | -7.218E-07 | -7.506E-06 | -4.092E-06 | -2.569E-05 | -8.386E-06 | -1.243E-05 | -3.033E-05 | -4.209E-05 | | |
| | 5 | -7.238E-07 | -7.523E-06 | -4.103E-06 | -2.577E-05 | -8.418E-06 | -1.248E-05 | -3.045E-05 | -4.227E-05 | | |
| | 6 | -2.075E-06 | -2.133E-05 | -1.167E-05 | -7.321E-05 | -2.409E-05 | -3.566E-05 | -8.650E-05 | -1.197E-04 | | |
| | 7 | -3.643E-06 | -3.088E-05 | -1.857E-05 | -1.083E-04 | -3.870E-05 | -5.728E-05 | -1.312E-04 | -1.535E-04 | | |
| 下部 インシュレータ | 8 | -2.060E-06 | -5.844E-06 | -5.889E-06 | -2.097E-05 | -9.722E-06 | -1.162E-05 | -2.841E-05 | -2.389E-05 | | |

INNER CORE = -7.011E-04
 OUTER CORE = -1.240E-03
 UPPER INS. = -6.041E-05
 DOWN INS. = -1.084E-04

注) S U S のドップラ効果を含ます。

$$\text{炉心} = -1.94 \times 10^{-3} T \cdot dk/dT$$

表2.2.8 MK-II炉心の30-100MW間平均出力係数測定結果

| cy | EFPD | 新燃料 装荷 体数 | BOC | | MOC | | EOC | | 出力係数変化率 (% $\Delta k/kk'/MW/MWd/t$) | | |
|-----|------|-----------------|----------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|---|---------|---------|
| | | | 燃焼度 (MWd/t) | 出力係数 (% $\Delta k/kk'/MW$) | 燃焼度 (MWd/t) | 出力係数 (% $\Delta k/kk'/MW$) | 燃焼度 (MWd/t) | 出力係数 (% $\Delta k/kk'/MW$) | BOC～EOC | BOC～MOC | MOC～EOC |
| 16 | 31.6 | 5 | 24,360 | -4.10E-03 | | | 28,570 | -3.62E-03 | 6.9E-08 | | |
| 17 | 68.4 | 9 | 22,090 | -4.73E-03 | | | 31,230 | -3.23E-03 | 1.4E-07 | | |
| 18 | 68.4 | 10 | 23,950 | -4.30E-03 | | | 33,090 | | | | |
| 19 | 68.7 | 9 | 25,310 | -3.85E-03 | | | 34,520 | -2.77E-03 | 1.0E-07 | | |
| 20 | 40.0 | 5 | 30,790 | -3.50E-03 | | | 36,190 | -2.90E-03 | 1.3E-07 | | |
| 21 | 68.8 | 12 | 25,930 | -3.72E-03 | | | 35,220 | -2.20E-03 | 1.7E-07 | | |
| 22 | 68.7 | 11 | 25,610 | -3.89E-03 | | | 34,880 | -2.33E-03 | 1.8E-07 | | |
| 23 | 52.8 | 9 | 26,980 | -3.49E-03 | | | 34,140 | -2.48E-03 | 1.0E-07 | | |
| 24 | 41.5 | 6 | 31,310 | -2.90E-03 | | | 36,850 | -2.21E-03 | 1.4E-07 | | |
| 25 | 64.9 | 9 | 27,460 | -3.37E-03 | | | 36,220 | -2.23E-03 | 1.3E-07 | | |
| 26 | 39.5 | 6 | 31,070 | -3.30E-03 | | | 36,410 | -2.43E-03 | 1.6E-07 | | |
| 27 | 30.1 | 4 | 32,640 | -2.94E-03 | 34,568 | -2.37E-03 | 36,700 | -2.34E-03 | 2.1E-07 | 3.0E-07 | 1.3E-08 |
| 28 | 6.1 | 3 | 34,690 | -2.62E-03 | | | 35,500 | -2.21E-03 | 8.2E-08 | | |
| 29 | 24.3 | 0 | 36,420 | -2.83E-03 | | | 39,660 | | | | |
| 29' | 0 | | | | | | 39,900 | -2.56E-03 | 7.8E-08 * | | |
| 29' | 0 | | | | | | 40,120 | -2.55E-03 | | | |
| 30 | 59.7 | 12 | 27,370 | -3.93E-03 | | | 35,420 | -2.11E-03 | 3.7E-07 | | |
| 31 | 54.9 | 12 | 24,870 | -3.88E-03 | 30,288 | -2.36E-03 | 32,260 | -2.15E-03 | 2.0E-07 | 2.8E-07 | 1.1E-07 |
| 32 | 69.0 | 10 | 24,410 | -3.43E-03 | | | 33,470 | -2.33E-03 | 1.0E-07 | | |
| 33 | 67.8 | 10 | 25,980 | -3.10E-03 | | | 35,090 | -2.34E-03 | 7.2E-08 | | |
| 34 | 68.9 | 10 | 28,370 | -3.39E-03 | 31,670 | -2.72E-03 | 36,580 | -2.28E-03 | 1.4E-07 | 2.0E-07 | 9.0E-08 |
| 35 | 48.2 | 10 | 30,950 | -2.88E-03 | 31,440 | -2.54E-03 | 37,030 | -2.17E-03 | 1.2E-07 | 6.9E-07 | 6.6E-08 |

*) 第29サイクルBOCと第29'サイクルの間の出力係数変化率

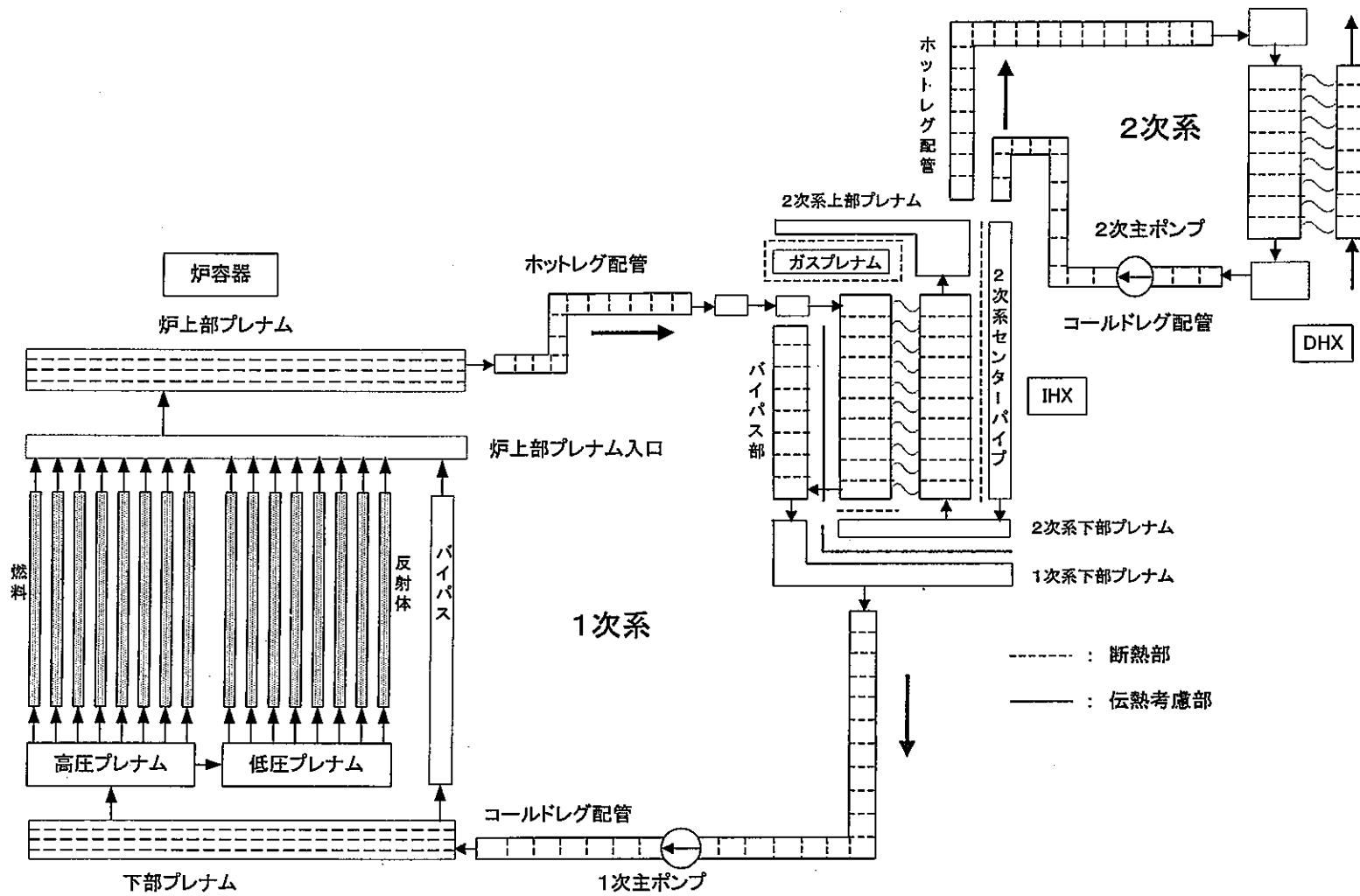
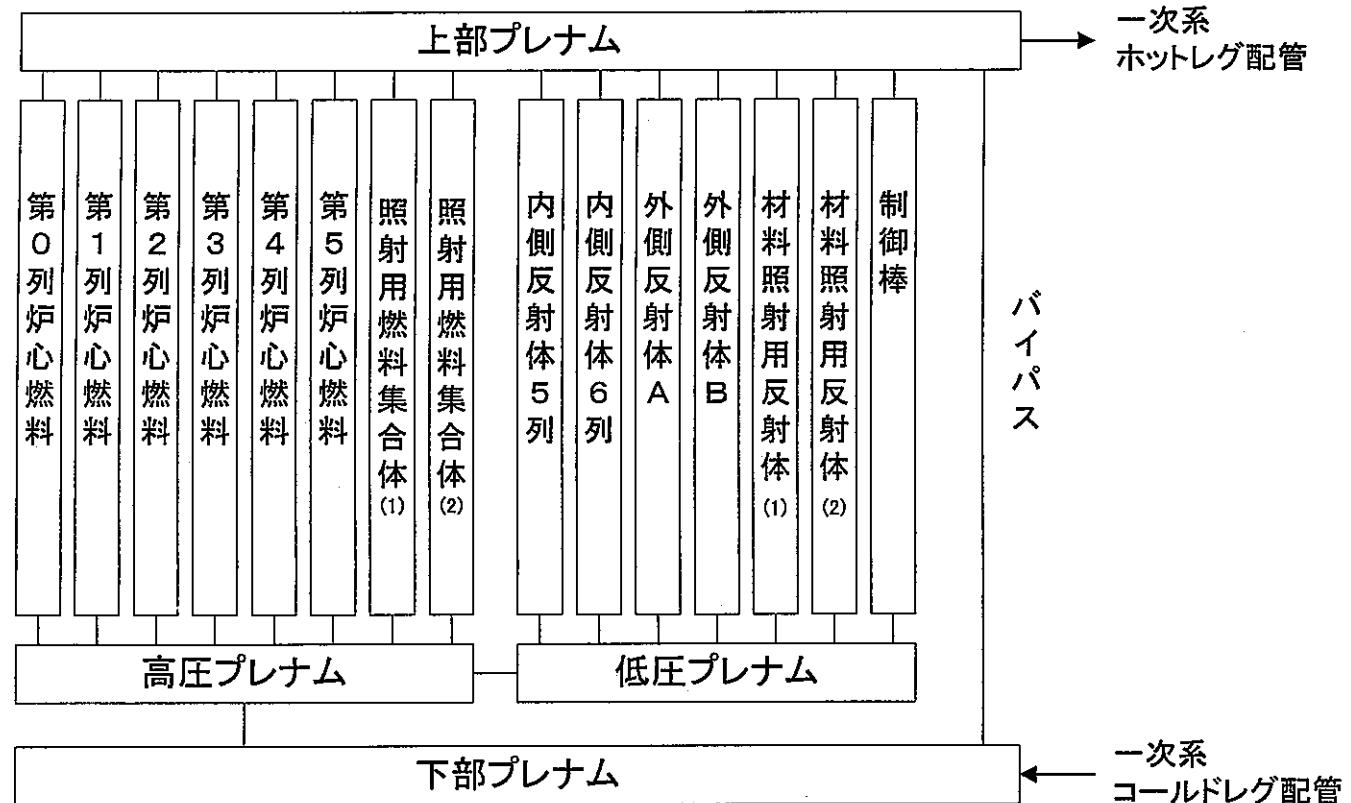


図 2.1.1 “Mimir-N2”計算モデル全体概要



* 反応度係数には2次元RZ計算による列平均の値を入力

図 2.2.1 冷却材流量配分計算モデル

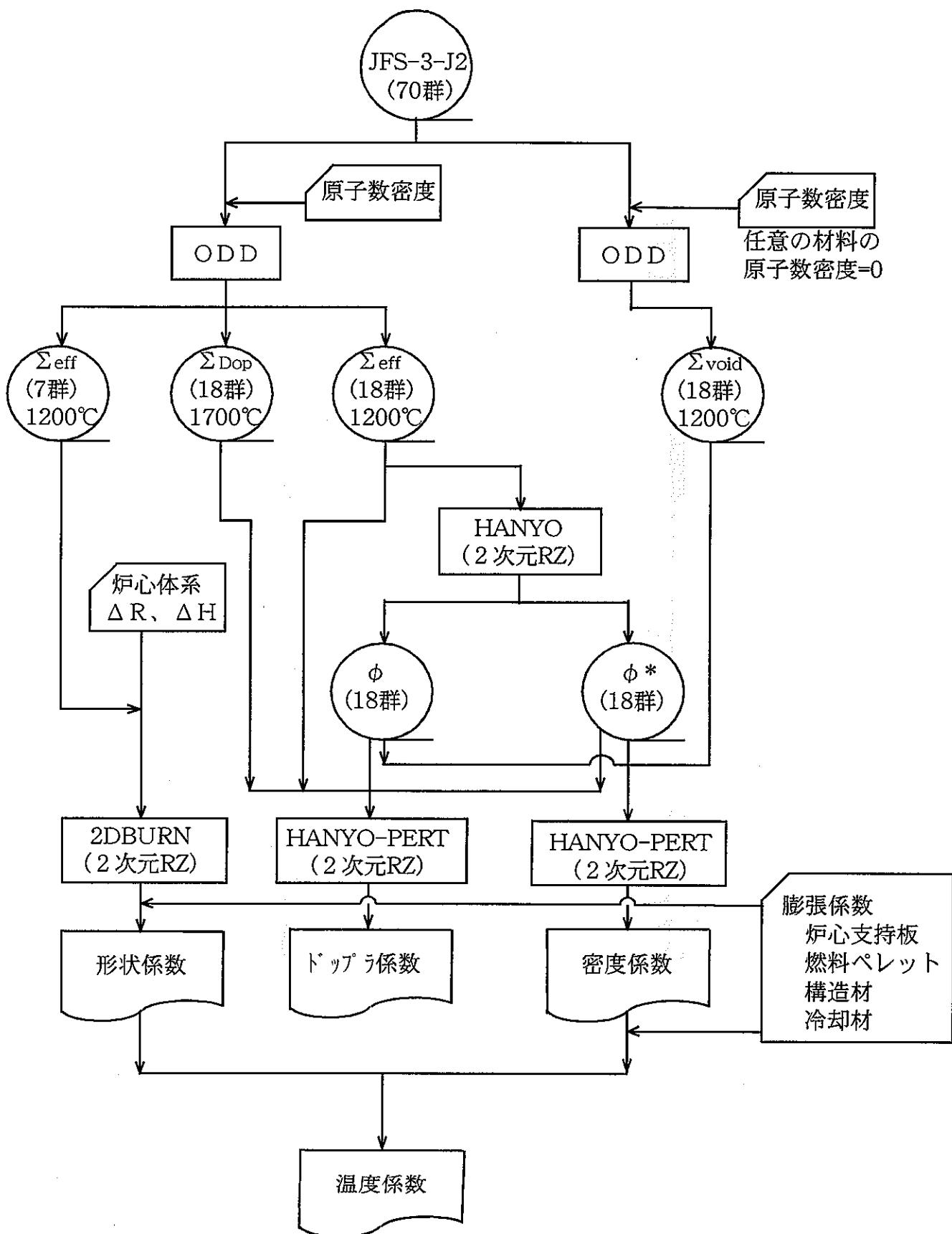


図2.2.2 温度係数計算フロー

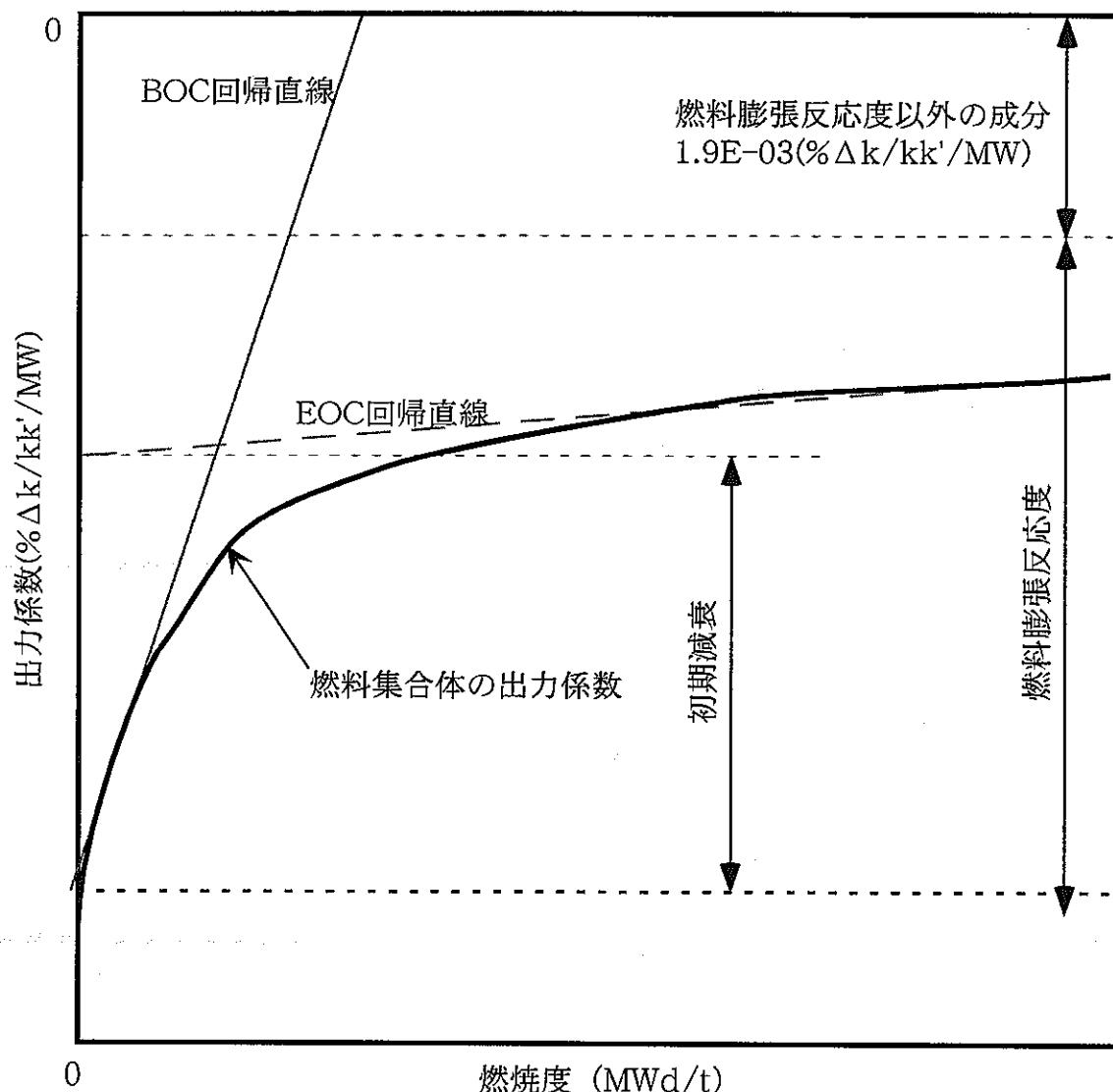


図2.2.3 出力係数の燃焼依存性考慮モデル概念図

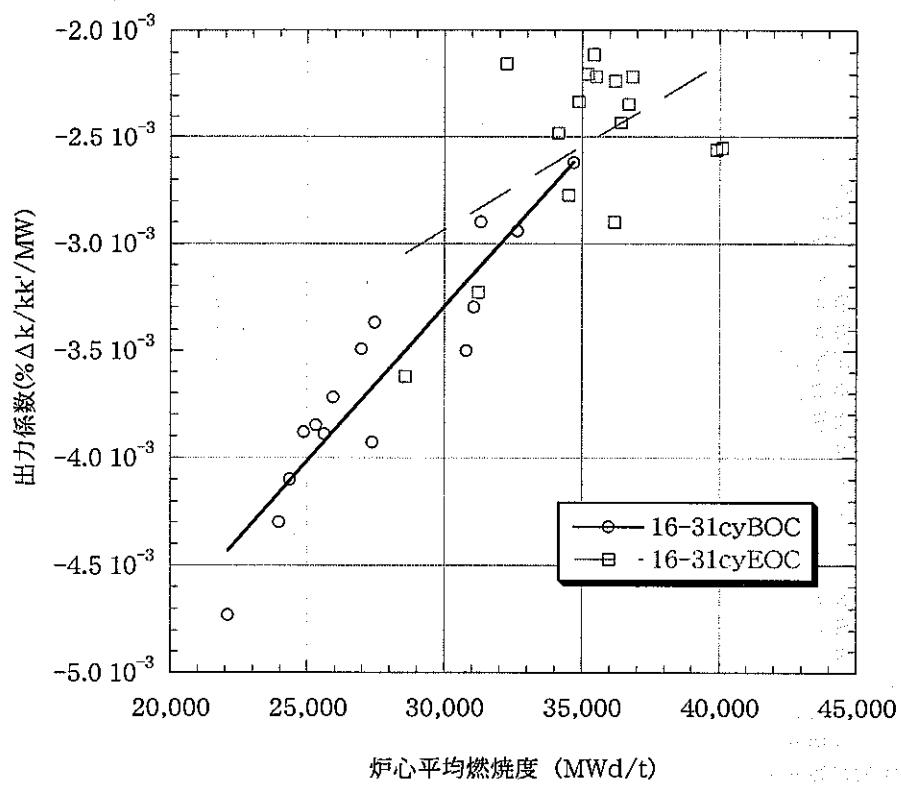


図2.2.4 「常陽」第16～31サイクル炉心の出力係数

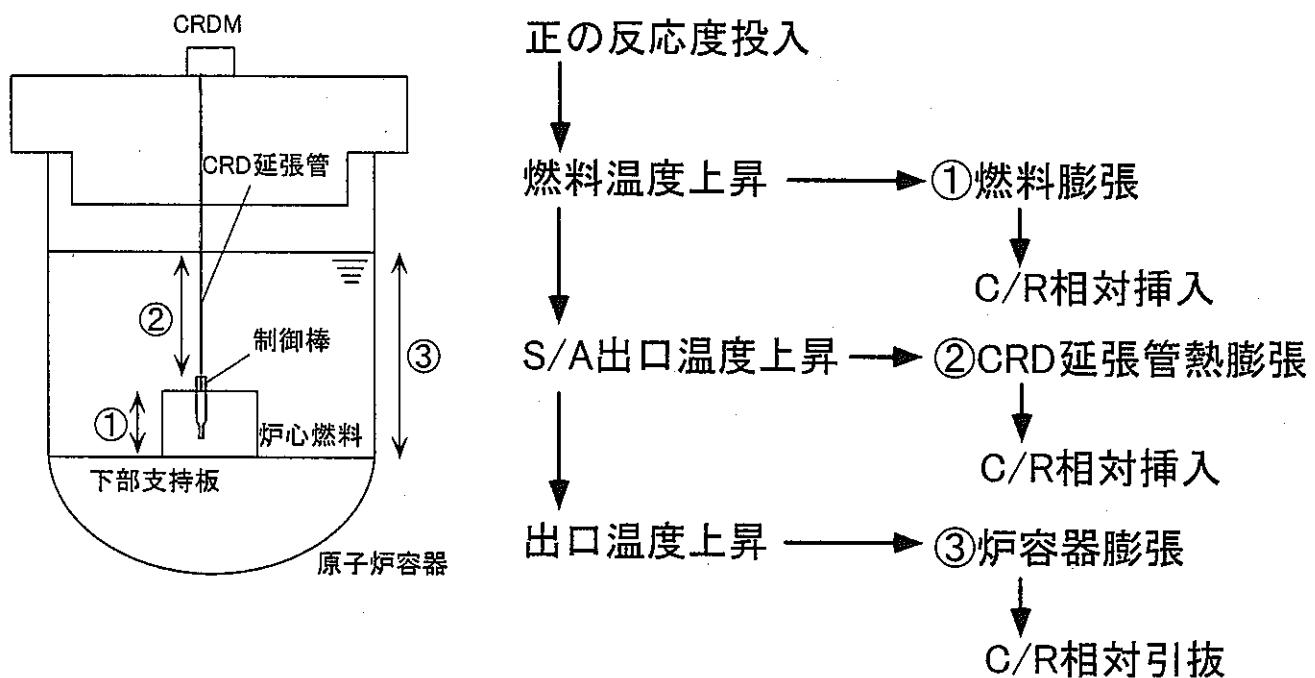


図 2.2.5 燃料と制御棒の相対変位反応度概念図

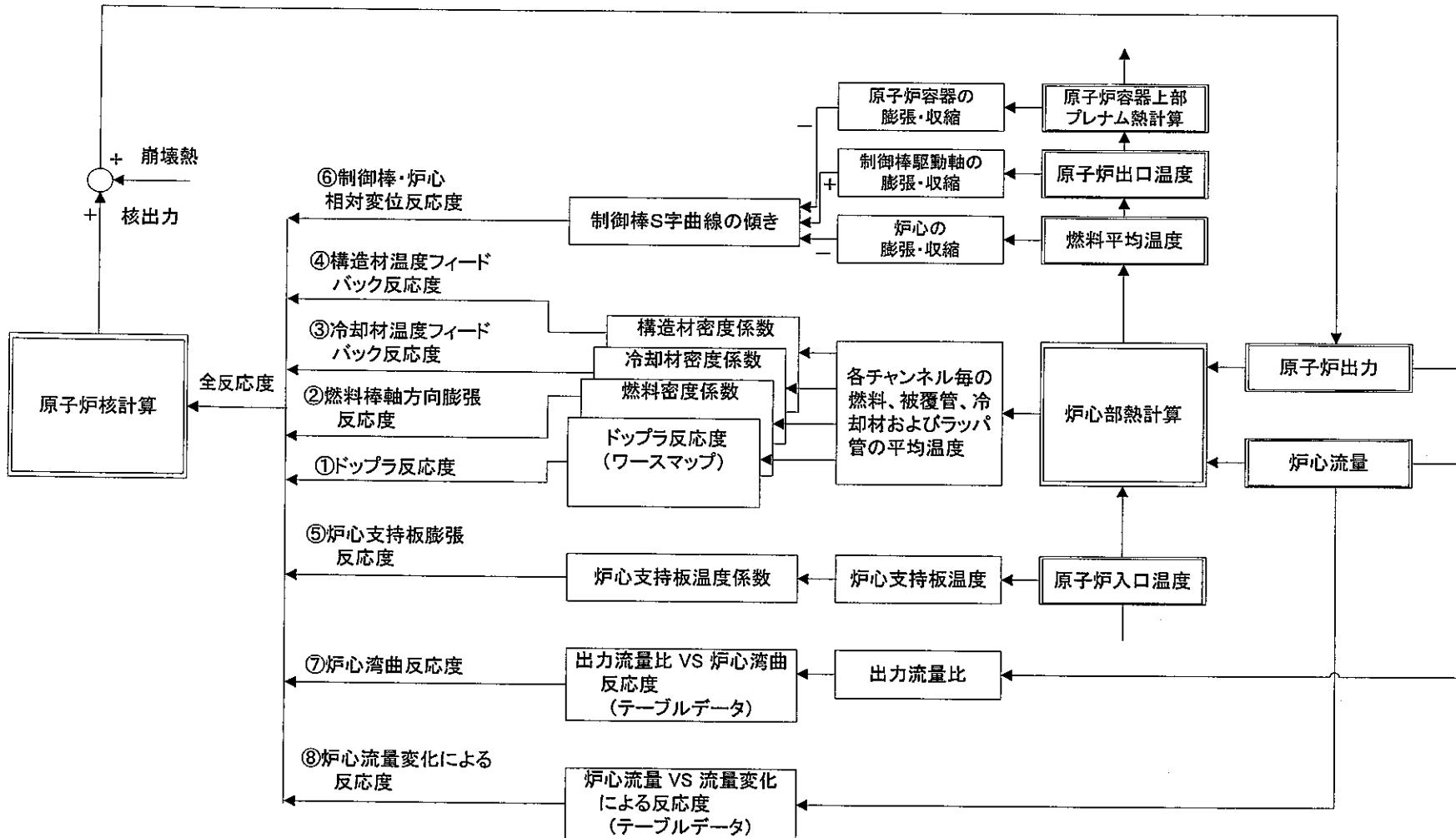


図 2.2.6 "Mimir-N2"のフィードバック反応度計算モデル

3. ステップ応答試験解析

3.1 ステップ応答試験の概要

ステップ応答試験^{9,10)}は、微小出力変動時のプラント安定性の確認を目的としたものであり、出力安定状態において制御棒をステップ状に操作することにより微小な正または負の反応度を炉心に投入し、その後のプラント挙動を測定するものである。MK-II炉心では、通常、原子炉起動時の出力上昇操作中、定格運転中及び原子炉停止のための出力降下操作中に数回のステップ応答試験を実施してきた。なお、本試験は出力上昇・降下操作を妨げない範囲で行うため、投入する反応度は±2~5¢程度としている。

3.2 解析結果

第2章で整備を行った"IMIR-N2"を用いてMK-II炉心で実施してきたステップ応答試験の解析を行った。本試験では、原子炉出力約89MWのプラント安定状態において、制御棒操作により-3.1¢の負の反応度をステップ状に投入した。この時の反応度計記録と"IMIR-N2"計算結果の比較を図3.2.1に、核計装応答と炉心第1列の炉心燃料集合体出口温度を図3.2.2に、原子炉出口温度と入口温度を図3.2.3に示す。

図3.2.1より、ステップ投入後、フィードバック効果により反応度はゼロに近づいて行く。「常陽」では、一次冷却材が一巡する約150s後、ステップ投入による冷却材温度の低下が原子炉入口温度に伝わり、これに伴い炉心支持板が熱収縮し、正の反応度が投入される。計算では、約150sで反応度が負から正に転じ、その後、フィードバック効果より約300s付近でピークとなり、再びゼロに近づいて行く挙動が見られ、実測値は、ばらつきはあるものの、概ね計算と同様の挙動を示していることがわかる。

図3.2.2より、核計装応答は、計算、実測とも、前述の反応度挙動に対してほぼ時間遅れなく追随して変動していることがわかる。これに対して、図3.2.2、3より、集合体出口温度、原子炉出口温度、入口温度と徐々に変動の時間遅れが大きくなるが、その変動量と時間挙動は、計算と実測で概ね一致していることがわかる。

以上より、ステップ応答試験においてドップラ反応度、燃料・構造材・冷却材膨張反応度等が支配的なステップ投入後0~150s間、炉心支持板膨張反応度の寄与が大きく、また、二次系の制御が働く150s以降においても、"Mimir-N2"による各プロセス量の計算値の変動量と時間推移が実測と良く一致することを確認した。

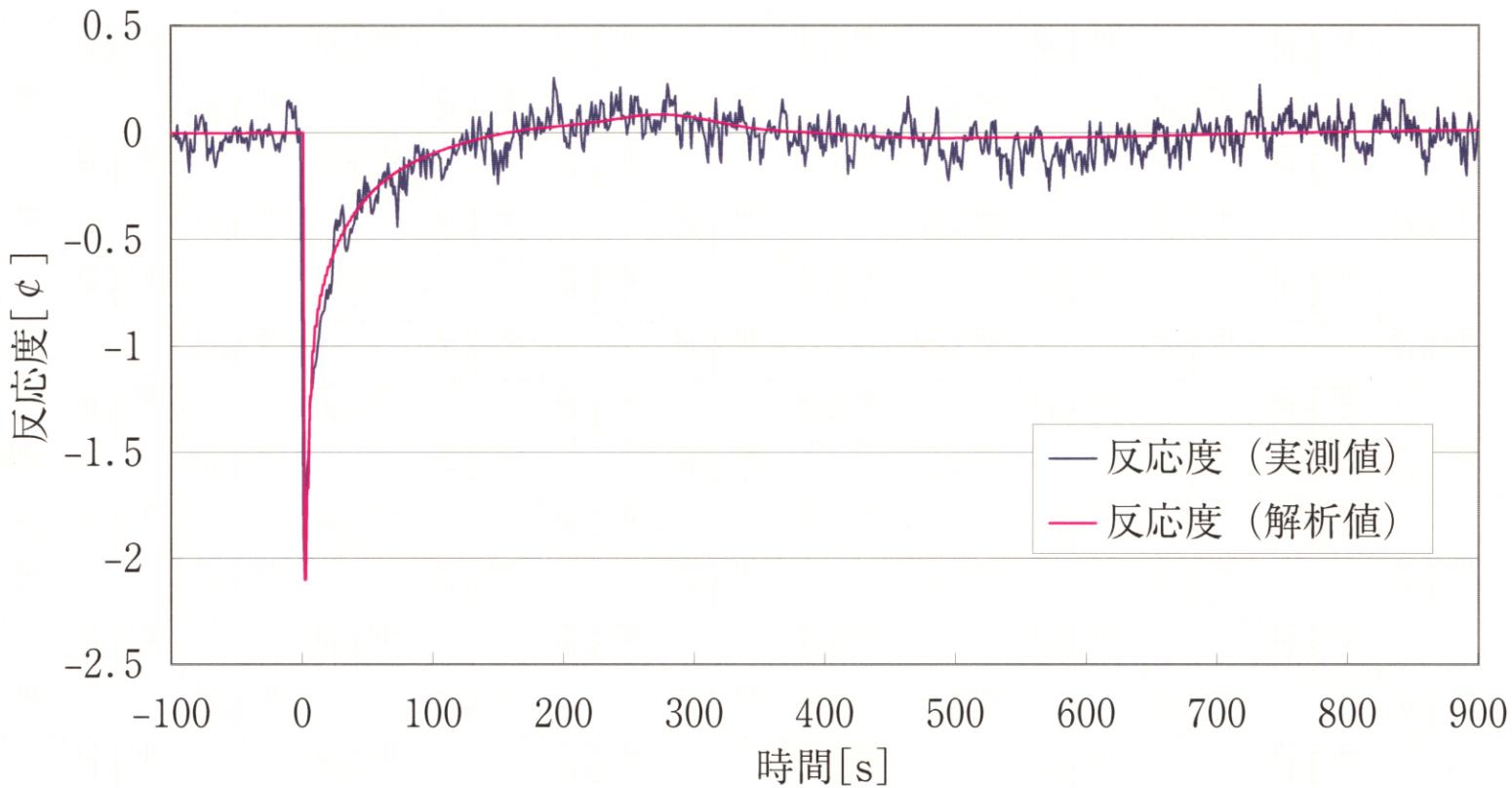


図3.2.1 第33サイクルステップ応答試験結果と”Mimir-N2”の比較（その1 反応度）
(出力： 88.28MWt 投入反応度： -3.127 ¢)

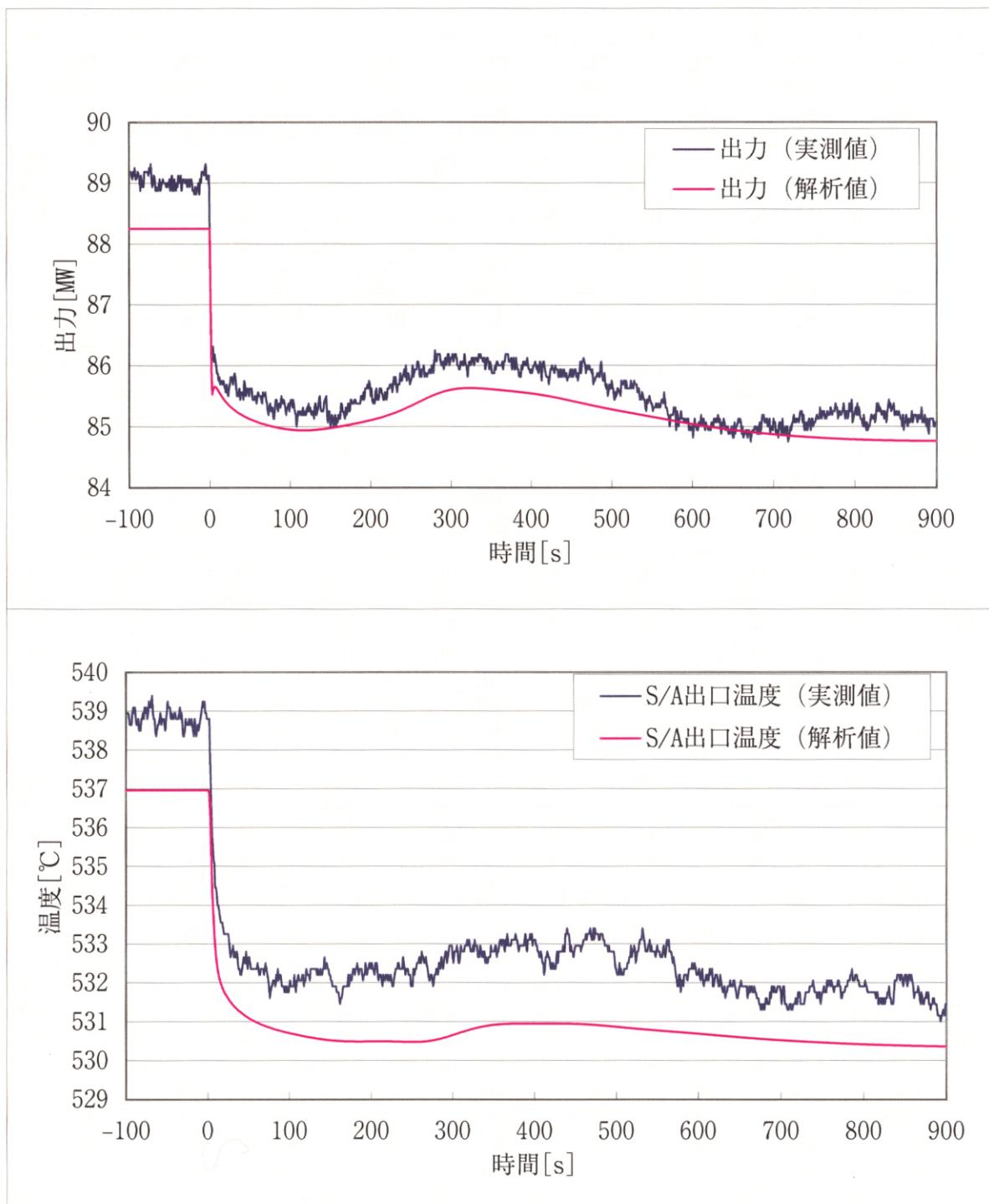


図3.2.2 第33サイクルステップ応答試験結果と”Mimir-N2”的比較
(その2 核計装応答と集合体出口温度)



図3.2.3 第33サイクルステップ応答試験結果と”Mimir-N2”の比較
(その3 原子炉出入口温度)

4. MK-III炉心の安全特性試験解析

4.1 目的及び方法

「常陽」を用いた安全特性試験の実施に関する検討では、高速炉の固有安全特性の実証を行う観点から、検討対象として、Anticipated Transient without Scram（以下、ATWSとする）試験のうち、Unprotected loss of Flow（以下、ULOF）試験とUnprotected Transient Over Power（以下、UTOP）試験を選択した。今回、現行の許可の範囲で実施可能な予備試験の条件を検討することを目的とし、必要に応じ、原子炉を部分出力とする等、初期条件を調整した状態で、スクラム条件を超える過渡を与えた場合においても、熱的制限値または熱設計基準値を超えない範囲で事象が終息する試験

条件をサーベイした。

計算は、「常陽」MK-III標準平衡炉心を対象とし、第2章で整備した "Mimir-N2" を用いて行った。ただし、燃料膨張反応度については、MK-III炉心における燃焼依存性に関するデータが得られていないため、MK-II炉心での経験を踏まえ、暫定的に絶対値を初期炉心時の1/3に設定することとした。

4.2 解析結果

これまでの検討を通じ、ATWS模擬事象の解析で最も影響が大きかったのは、燃料膨張反応度の見直しであり、これにより、特に、UTOP事象発生直後のフィードバック反応度が小さくなり、炉心湾曲反応度、制御棒と燃料の相対位置変位による反応度の寄与が相対的に大きくなる結果となった。一例として、MK-III炉心におけるTOP型事象の解析例を図4.2.1と図4.2.2に示す。

図4.2.1は、定格出力状態において制御棒誤引抜きが生じ、スクラムに失敗するケースであるが、試験実施上の観点から、燃料最高温度が熱設計基準値（2650°C）未満となるよう制御棒引抜き量を制限した。定格出力状態から制御棒を引抜くことにより、燃料温度が急激に上昇した後、反応度フィードバック効果により約90sでピーク（2639°C）に達し、その後静定する。この間、原子炉出力は、スクラム設定点（105%）を超え、最大120%（約170MW）に達するが、被覆管肉厚中心温度、冷却材温度とも熱設計基準値を超えることはない。

また、図4.2.2は、部分出力（50%出力）において制御棒誤引抜きが生じたケースであるが、この時の燃料最高温度については、熱的制限値である2350°C未満とした。この場合、急激な出口温度の上昇に対して二次系の制御が働くことにより、原子炉入口温度が低下し、炉心支持板膨張反応度が働くため、約300s付近に反応度ピークが生じる。この時の原子炉出力は初期出力の約2倍の103.2%であり、中性子束高の警報は発報するが、スクラムには至らない。

初期の出力ピークには燃料膨張反応度とドップラ反応度の寄与が大きく、二次ピークには炉心支持板膨張反応度の寄与が大きい。これら3成分のうち、他の成分に比べ絶対値が大きく、かつ運転中に変動することから、試験計画の策定にあたっては、特に燃料膨張反応度の評価が重要である。このため、今後、2.2で述べたMK-II炉心での燃料膨張反応度の評価をMK-III炉心についても行い、その結果を反映して整備した"Mirin-N2"を用いて解析を行うことにより、高い予測精度での試験実施が期待できる。

なお、図4.2.1の400s～800sにみられる原子炉出力の変動は、2.2で述べたように、MK-III炉心の炉心湾曲反応度が、炉心燃料領域の密度変化による効果と中性子遮へい体の変位による効果のバランスによって決まるため、湾曲形状によって反応度の正負が逆転する領域が存在することによるものである。このため、安全特性試験の実施計画を策定する場合、図4.2.2に示すように大きな二次ピークが発生するケースで、ピーク出力が炉心湾曲反応度の正負が逆転する領域にある場合には注意が必要である。

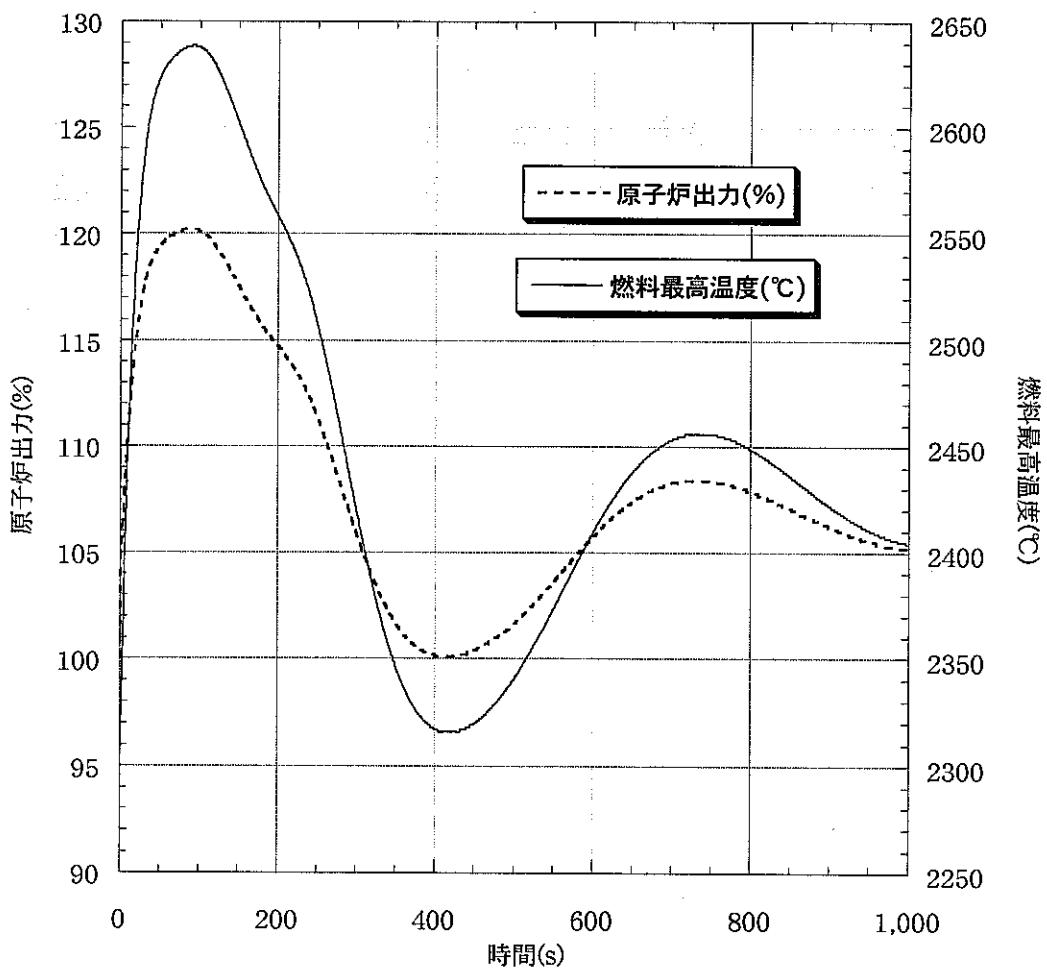


図4.2.1 定格出力からのUTOP模擬試験予測解析結果

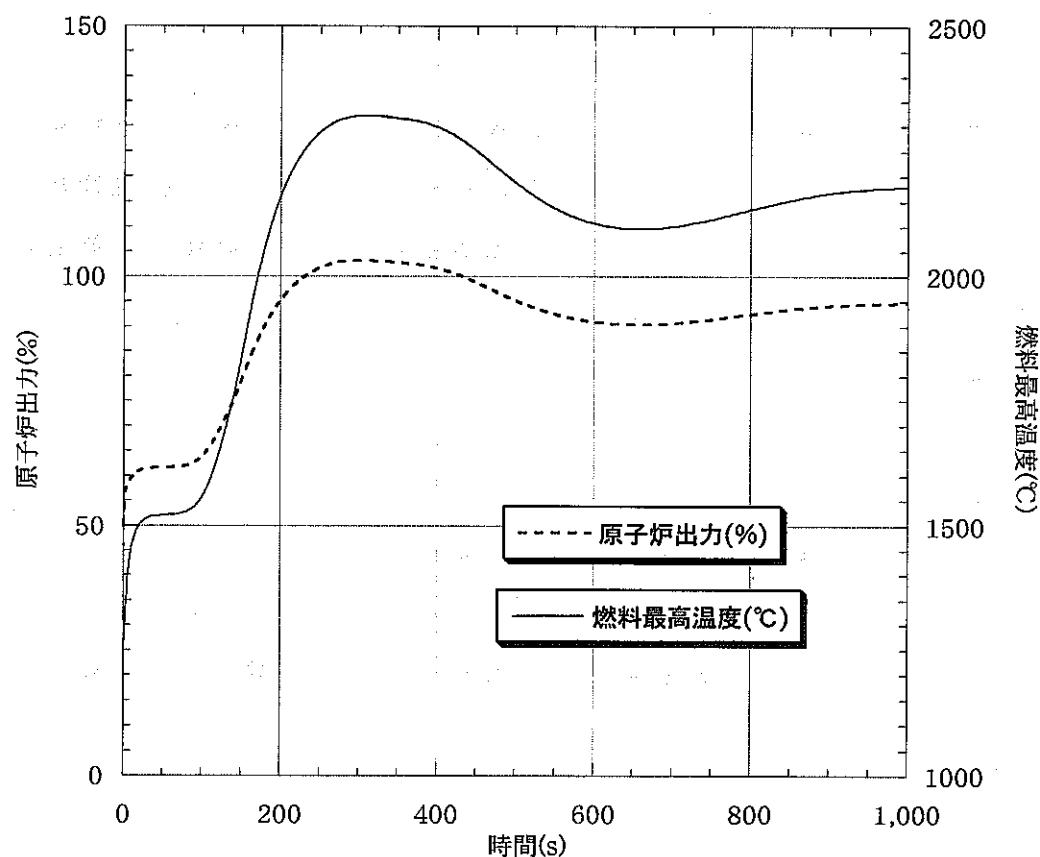


図4.2.2 部分出力からのUTOP模擬試験予測解析結果

5. 結 言

「常陽」のプラントデータ及び運転特性試験を通じて得られた知見を基に "Mimir-N2" を整備することにより、ステップ応答試験解析において、ステップ状投入反応度投入直後の反応度フィードバック現象や外乱発生後一次冷却材が一巡した後の炉心支持板熱変位に伴うプラント状態の変動等、安全特性試験の検討を行っていく上で重要な挙動を良く模擬できるようになった。

上記 "Mimir-N2" を用いて安全特性試験の予備解析を行った結果、反応度効果としては小さいが、原子炉出力状態によって変動する可能性のある炉心湾曲反応度に関しては、その挙動を把握しておくことが試験計画策定上重要であることがわかった。

なお、炉心湾曲反応度に関しては、これまで、出力係数の出力依存性に着目して検討を行って来たが、今後、出力運転中の冷却材流量を変更し、通常運転範囲を超えるP/F領域を作成した状態で、ステップ応答試験を実施することにより、検証データを拡張すること等が安全特性試験の実施に向けては有効と考えられる。

今後、主中間熱交換機、主冷却器の特性データなど、MK-III改造後の炉心・プラントデータを反映しつつ、MK-III性能試験解析を通じて "Mimir-N2" を整備し、ATWS模擬試験の検討を進めて行く計画である。

参考文献

- 1) 沢田誠 他、『高速実験炉「常陽」試験報告書 自然循環試験II-E (100MW過渡試験) 結果報告』、PNC ZN9410 88-049(1988)
- 2) A. Yoshida, et al., "Core and Fuel Management Experience of "JOYO" and its Upgrading Program", PHYSOR '96, Mito, Japan, Vol.3 pI-28~37 (1996)
- 3) 大洗工学センター原子炉設置変更許可申請書添付書類8
- 4) 三菱原子力工業株式会社、『高速増殖炉核設計コードの概要』、MAPI-F-0001 (1981)
- 5) 吉田昌宏 他、『"Mimir-N2"による「常陽」MK-II炉心のステップ応答解析』、JNC TN9400 99-027(1999)
- 6) 鈴木俊宏、市毛 聰、鈴木惣十、"高速炉安全特性研究のための「常陽」炉心支持板変形解析"、PNC TN9410 96-269,(1996)
- 7) 吉田昌宏、鈴木俊宏、鈴木惣十、他、"高速実験炉「常陽」における炉心支持板流力変位の反応度効果"、動燃技報No.103、P21(1997)
- 8) 吉田昌宏 他、『「常陽」MK-II炉心の炉心湾曲反応度解析』、JNC TN9410 2001-009(2001)
- 9) 庄野彰 他、『高速実験炉「常陽」運転特性試験報告書 ステップ応答法による反応度フィードバック特性の監視』、PNC TN941 85-146(1985)
- 10) 島田裕一 他、『高速実験炉「常陽」運転特性試験報告書 ステップ応答法による反応度フィードバック特性の監視(II)』、PNC ZN9410 90-097(1990)