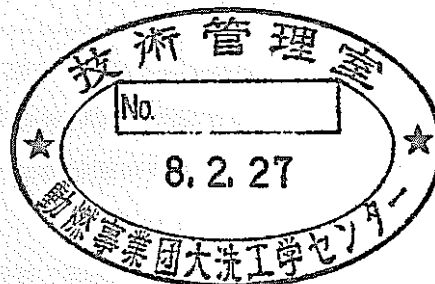


「常陽」における
安全特性試験の予備計算

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)

1995年3月



株式会社 **東芝**

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)

「常陽」における安全特性試験の予備計算⁽¹⁾

森木 保幸⁽²⁾、川島 正俊⁽²⁾

要 旨

「常陽」を利用する高速炉の固有の安全特性の確認試験が検討されている。このような試験のためには、出力係数などのフィードバックが正確に予測できることが重要である。本検討では、MK-II 炉心初期サイクルと第27サイクルで測定されている出力係数を解析した。特に、支配要因を明確にするために燃料温度履歴を考慮する評価モデルを提案し検討した。

主要な結論として、出力係数の解析評価では、燃料集合体の照射履歴を考慮した燃料温度評価および燃料軸方向膨張モデルが重要であること、および出力係数の炉出力依存性は、燃料軸方向膨張モデルとして燃料中心温度反映モデルで評価することで、測定値間に観測されている燃焼に伴う出力係数の変動傾向はほぼ再現できることがわかった。

このことから、今回適用したモデルをベースに、解析結果を”適切に”調節するモデルを取り入れる方式を今後の研究のなかで確立していくことが重要なことが分かった。

更に、プラントの構造に直接関わる反応度、炉心湾曲効果など試験の初期状態を明確に定義することが困難なことによるモデルの難しさをどのように考慮するかについても今後検討を深化させる必要がある。

(1) 本報告書は、(株)東芝が動力炉・核燃料開発事業団との契約に基づいて実施した業務の成果である。

契約番号；06C3844

事業団担当部課；大洗工学センター 実験炉部技術課

事業団担当者；長沖 吉弘

(2) (株)東芝 原子力技術研究所

March, 1995

A Preliminary Analysis for Transient Safety Tests in JOYO ⁽¹⁾

Yasuyuki Moriki ⁽²⁾

Masatoshi Kawashima ⁽²⁾

Abstract

As for demonstrating inherent safety features in fast reactors, transient safety tests will be planned using the experimental fast reactor JOYO. Accurate prediction for power reactivity-coefficients is most important to the core transients prediction.

This work analysed the power coefficients measured in the initial and 27th cycles for the MK-2 cores. Major emphases were placed on the fuel temperature calculations and fuel axial expansion modelling proposed. The analyses explained that the observed systematic variations with core burnup were reproduced fairly well combining with two aspects mentioned above.

These results have implied that further studies would include adjustment methodology development for the proper basic feedback model through various measurements as to establishing total reactivity feedback model to the Joyo core. Such methodology development efforts are required to the core bowing reactivity effects and feedback factors associated with the plant structure and operational schemes, hereafter.

(1) The work performed by Toshiba Corporation under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation. Contract No.; 06M3844,

PNC Liason; Reactor Technology Section, Experimental Reactor Division, OEC,
Yoshihiro Nagaoki.

(2) Nuclear Engineering Laboratory, Toshiba Corporation

目 次

要 旨

目 次

表一覧

図一覧

1. はじめに -----	1
2. 出力係数の成分分離 -----	2
2.1 検討内容 -----	2
2.2 反応度係数評価 -----	7
2.2.1 解析方法 -----	7
2.2.2 解析結果 -----	9
2.3 等温係数評価 -----	36
2.3.1 解析方法 -----	36
2.3.2 解析結果 -----	41
2.4 出力係数測定結果の概要 -----	51
2.4.1 第 0 サイクル（出力上昇試験時）の測定結果 -----	51
2.4.2 第 27 サイクルの測定結果 -----	55
2.5 温度評価 -----	81
2.5.1 解析方法 -----	81
2.5.2 解析条件 -----	90
2.5.3 解析結果 -----	92
2.6 出力係数評価 -----	152
2.6.1 解析方法 -----	152
2.6.2 解析結果 -----	155
2.7 まとめ -----	183

3. 海外高速炉における安全特性試験の調査 -----	185
3.1 海外高速炉における反応度成分分離の検討 -----	185
3.2 まとめ -----	189
4. おわりに -----	197

付録

A.1 燃料熱伝導率の比較 -----	199
---------------------	-----

表一覽

表2.2-1	第0サイクル初期の反応度係数
表2.2-2	第0サイクル末期の反応度係数
表2.2-3	第0サイクル初期における燃料密度係数の空間分布
表2.2-4	第0サイクル初期における構造材密度係数の空間分布
表2.2-5	第0サイクル初期における冷却材密度係数の空間分布
表2.2-6	第0サイクル初期における吸収材 (B ₄ C) 密度係数の空間分布
表2.2-7	第0サイクル初期におけるドップラー係数の空間分布
表2.2-8	第0サイクル末期における燃料密度係数の空間分布
表2.2-9	第0サイクル末期における構造材密度係数の空間分布
表2.2-10	第0サイクル末期における冷却材密度係数の空間分布
表2.2-11	第0サイクル末期における吸収材 (B ₄ C) 密度係数の空間分布
表2.2-12	第0サイクル末期におけるドップラー係数の空間分布
表2.2-13	第27サイクル初期の反応度係数
表2.2-14	第27サイクル末期の反応度係数
表2.2-15	第27サイクル初期における燃料密度係数の空間分布
表2.2-16	第27サイクル初期における構造材密度係数の空間分布
表2.2-17	第27サイクル初期における冷却材密度係数の空間分布
表2.2-18	第27サイクル初期における吸収材 (B ₄ C) 密度係数の空間分布
表2.2-19	第27サイクル初期におけるドップラー係数の空間分布
表2.2-20	第27サイクル末期における燃料密度係数の空間分布
表2.2-21	第27サイクル末期における構造材密度係数の空間分布
表2.2-22	第27サイクル末期における冷却材密度係数の空間分布
表2.2-23	第27サイクル末期における吸収材 (B ₄ C) 密度係数の空間分布
表2.2-24	第27サイクル末期におけるドップラー係数の空間分布
表2.3-1	第0サイクル初期の等温係数

- 表2.3-2 第0サイクル末期の等温係数
- 表2.3-3 第0サイクル初期の燃料軸方向膨張量
- 表2.3-4 第0サイクル末期の燃料軸方向膨張量
- 表2.3-5 第0サイクル初期の等温係数（相対変位考慮）
- 表2.3-6 第0サイクル末期の等温係数（相対変位考慮）
- 表2.3-7 第27サイクル初期の等温係数
- 表2.3-8 第27サイクル末期の等温係数
- 表2.3-9 第27サイクル初期の燃料軸方向膨張量
- 表2.3-10 第27サイクル末期の燃料軸方向膨張量
- 表2.3-11 第27サイクル初期の等温係数（相対変位考慮）
- 表2.3-12 第27サイクル末期の等温係数（相対変位考慮）

- 表2.4-1 第0-1サイクルの出力係数測定結果
- 表2.4-2 第0-2サイクルの出力係数測定結果
- 表2.4-3 第0-3サイクルの出力係数測定結果
- 表2.4-4 第0-4サイクルの出力係数測定結果
- 表2.4-5 第0-5サイクルの出力係数測定結果
- 表2.4-6 第0-6サイクルの出力係数測定結果
- 表2.4-7 第0-7サイクルの出力係数測定結果
- 表2.4-8 第0-8サイクルの出力係数測定結果
- 表2.4-9 第0-9サイクルの出力係数測定結果

- 表2.5-1 物性値及び物性定数
- 表2.5-2 温度評価用第0-1サイクルの運転履歴
- 表2.5-3 温度評価用第0-2サイクルの運転履歴
- 表2.5-4 温度評価用第0-3サイクルの運転履歴
- 表2.5-5 温度評価用第0-4サイクルの運転履歴
- 表2.5-6 温度評価用第0-5サイクルの運転履歴

表2.5-7	温度評価用第0-6サイクルの運転履歴
表2.5-8	温度評価用第0-7サイクルの運転履歴
表2.5-9	温度評価用第0-8サイクルの運転履歴
表2.5-10	温度評価用第0-9サイクルの運転履歴
表2.5-11	第27サイクル炉心構成燃料集合体の照射履歴
表2.5-12	第19～27サイクルの運転履歴
表2.5-13	1群化した核分裂断面積
表2.5-14	燃料挙動解析コード”S I E X”の入力データ例 - 000(pfd001)-
表2.5-15	第0サイクルにおける等軸晶領域、柱状晶領域及びセンターボイド領域の生成ステップ
表2.6-1	100%定格出力運転時の各部温度
表A.1-1	第0サイクルにおける等軸晶領域、柱状晶領域及びセンターボイド領域の生成ステップ - 燃料熱伝導率；ANL/RAS 81-16(1981)-

図 一 覧

- 図2.1-1 出力係数成分分離の検討フロー
- 図2.1-2 第0サイクル出力上昇試験時の炉心配置
- 図2.1-3 第27サイクルの炉心配置

- 図2.2-1 第0サイクル炉心（出力上昇試験炉心）の二次元R Zモデル
- 図2.2-2 第27サイクル炉心の二次元R Zモデル

- 図2.4-1 第0サイクル出力上昇試験時の運転実績
- 図2.4-2 第0-1サイクルの出力係数測定結果
- 図2.4-3 第0-2サイクルの出力係数測定結果
- 図2.4-4 第0-3サイクルの出力係数測定結果
- 図2.4-5 第0-4サイクルの出力係数測定結果
- 図2.4-6 第0-5サイクルの出力係数測定結果
- 図2.4-7 第0-6サイクルの出力係数測定結果
- 図2.4-8 第0-7サイクルの出力係数測定結果(1)
- 図2.4-9 第0-7サイクルの出力係数測定結果(2)
- 図2.4-10 第0-7サイクルの出力係数測定結果(3)
- 図2.4-11 第0-8サイクルの出力係数測定結果
- 図2.4-12 第0-9サイクルの出力係数測定結果(1)
- 図2.4-13 第0-9サイクルの出力係数測定結果(2)
- 図2.4-14 第0-7サイクルの出力係数測定結果（出力上昇時と出力下降時の比較）
- 図2.4-15 第0-9サイクルの出力係数測定結果（出力上昇時と出力下降時の比較）
- 図2.4-16 第27サイクルの出力係数測定結果

- 図2.5-1 S I E Xコードの燃料ピンモデル
- 図2.5-2 H G A Pのフローチャート

- 図2.5-3 ギャップコンダクタンスと種々の原因の相互関係
- 図2.5-4 S T R U C T のフローチャート
- 図2.5-5 F I S G A S のフローチャート
- 図2.5-6 温度計算用軸方向モデル
- 図2.5-7 第0サイクルにおける中心燃料集合体の燃料再結晶状態（ステップ-60）
- 図2.5-8 第0サイクルにおける中心燃料集合体の燃料再結晶状態（ステップ-61）
- 図2.5-9 第0サイクルにおける中心燃料集合体の燃料再結晶状態（ステップ-63）
- 図2.5-10 第0サイクルにおける中心燃料集合体の燃料再結晶状態（ステップ-71）
- 図2.5-11 第0サイクルにおける中心燃料集合体の燃料再結晶状態（ステップ-74）
- 図2.5-12 第0サイクルにおける中心燃料集合体の燃料再結晶状態（ステップ-93）
- 図2.5-13 第0サイクルにおける中心燃料集合体の燃料再結晶状態（ステップ-96）
- 図2.5-14 第0サイクルにおける中心燃料集合体の燃料再結晶状態（ステップ-99）
- 図2.5-15 第0-6サイクル出力上昇における燃料温度変化（000-PFD001）
- 図2.5-16 第0-7サイクル出力上昇における燃料温度変化（000-PFD001）
- 図2.5-17 第0-7サイクル出力上昇における燃料温度変化（1B1-PFD003）
- 図2.5-18 第0-7サイクル出力上昇における燃料温度変化（2B1-PFD010）
- 図2.5-19 第0-7サイクル出力上昇における燃料温度変化（3B1-PFD022）
- 図2.5-20 第0-7サイクル出力上昇における燃料温度変化（4B1-PFD036）
- 図2.5-21 第0-7サイクル出力上昇における燃料温度変化（5B3-PFD057）
- 図2.5-22 第0-7サイクル出力下降における燃料温度変化（000-PFD001）
- 図2.5-23 第0-7サイクル出力下降における燃料温度変化（1B1-PFD003）
- 図2.5-24 第0-7サイクル出力下降における燃料温度変化（2B1-PFD010）
- 図2.5-25 第0-7サイクル出力下降における燃料温度変化（3B1-PFD022）
- 図2.5-26 第0-7サイクル出力下降における燃料温度変化（4B1-PFD036）
- 図2.5-27 第0-7サイクル出力下降における燃料温度変化（5B3-PFD057）
- 図2.5-28 第27サイクル初期出力上昇における燃料温度変化（000-PFD533）
- 図2.5-29 第27サイクル初期出力上昇における燃料温度変化（1B1-PFD518）
- 図2.5-30 第27サイクル初期出力上昇における燃料温度変化（2B1-PFD520）

- 図2.5-31 第27サイクル初期出力上昇における燃料温度変化 (3B1-PFD509)
- 図2.5-32 第27サイクル初期出力上昇における燃料温度変化 (4B1-PFD503)
- 図2.5-33 第27サイクル初期出力上昇における燃料温度変化 (5B3-PFD245)
- 図2.5-34 第27サイクル末期出力下降における燃料温度変化 (000-PFD533)
- 図2.5-35 第27サイクル末期出力下降における燃料温度変化 (1B1-PFD518)
- 図2.5-36 第27サイクル末期出力下降における燃料温度変化 (2B1-PFD520)
- 図2.5-37 第27サイクル末期出力下降における燃料温度変化 (3B1-PFD509)
- 図2.5-38 第27サイクル末期出力下降における燃料温度変化 (4B1-PFD503)
- 図2.5-39 第27サイクル末期出力下降における燃料温度変化 (5B3-PFD245)

- 図2.6-1 燃料ペレットの軸方向膨張概念図
- 図2.6-2 燃料と制御棒の相対変位モデル
- 図2.6-3 第0サイクル出力上昇試験時の制御棒ストローク曲線
- 図2.6-4 制御棒と炉容器代表長さ
- 図2.6-5 第0-1サイクル出力上昇における出力係数の測定値と解析値の比較
- 図2.6-6 第0-2サイクル出力上昇における出力係数の測定値と解析値の比較
- 図2.6-7 第0-3サイクル出力上昇における出力係数の測定値と解析値の比較
- 図2.6-8 第0-4サイクル出力上昇における出力係数の測定値と解析値の比較
- 図2.6-9 第0-5サイクル出力上昇における出力係数の測定値と解析値の比較
- 図2.6-10 第0-6サイクル出力上昇における出力係数の測定値と解析値の比較
- 図2.6-11 第0-7サイクル出力上昇(1)における出力係数の測定値と解析値の比較
- 図2.6-12 第0-7サイクル出力下降における出力係数の測定値と解析値の比較
- 図2.6-13 第0-7サイクル出力上昇(2)における出力係数の測定値と解析値の比較
- 図2.6-14 第0-8サイクル出力上昇における出力係数の測定値と解析値の比較
- 図2.6-15 第0-9サイクル出力上昇における出力係数の測定値と解析値の比較
- 図2.6-16 第0-9サイクル出力下降における出力係数の測定値と解析値の比較
- 図2.6-17 第27サイクル初期出力上昇における出力係数の測定値と解析値の比較
- 図2.6-18 第27サイクル末期出力下降における出力係数の測定値と解析値の比較

- 図2.6-19 第0-7サイクル出力上昇における出力係数の内訳（解析値）
- 図2.6-20 第0-7サイクル出力下降における出力係数の内訳（解析値）
- 図2.6-21 第27サイクル初期出力上昇における出力係数の内訳（解析値）
- 図2.6-22 第27サイクル末期出力下降における出力係数の内訳（解析値）
- 図2.6-23 第0サイクルおよび第27サイクルの出力係数測定値
- 図2.6-24 第0サイクルおよび第27サイクルの出力係数解析値（モデル-A）
- 図2.6-25 第0サイクルおよび第27サイクルの出力係数解析値（モデル-B）

- 図3.1-1 EBR-2 炉における出力上昇による反応度変化の線形・非線形成分の分離例（Run 85A, 93A, 99A, 122A）
- 図3.1-2 EBR-2 炉心湾曲計算（ラッパ管未照射想定）結果による反応度と測定値から帰納した非線形成分の比較（Run 85A, 93A, 99A, 122A）
- 図3.1-3 EBR-2 RUN 93A における湾曲計算モデル（セクター分割、非分割）の違いによる反応度計算結果の比較
- 図3.1-4 EBR-2 RUN 99A における集合体湾曲量の計算と測定値の比較(1)
- 図3.1-5 EBR-2 RUN 99A における集合体湾曲量の計算と測定値の比較(2)
- 図3.1-6 EBR-2 RUN 99A 炉心における湾曲計算における初期スエリング設定量の変動とクリープの組合せサーベイ結果
- 図3.1-7 EBR-2 RUN122A 炉心における湾曲計算における初期スエリング設定量の変動とクリープの組合せサーベイ結果
- 図3.1-8 EBR-2 RUN 56～ 138までの間の反射体交換と出力上昇に対する反応度減少量観測値の相関関係

- 図A.1-1 第0-7サイクル出力上昇における燃料温度変化（000-PFD001）
- 図A.1-2 第0-7サイクル出力上昇における燃料温度変化（1B1-PFD003）
- 図A.1-3 第0-7サイクル出力上昇における燃料温度変化（2B1-PFD010）
- 図A.1-4 第0-7サイクル出力上昇における燃料温度変化（3B1-PFD022）
- 図A.1-5 第0-7サイクル出力上昇における燃料温度変化（4B1-PFD036）
- 図A.1-6 第0-7サイクル出力上昇における燃料温度変化（5B3-PFD057）

1. はじめに

高速炉の合理的な安全論理の構築の一助けとして、「常陽」を利用した固有の安全特性の確認試験の実施が計画されている。このためには、炉物理解析、プラントの動特性解析、燃料挙動解析、炉心変形解析等が必要である。

本検討は、その予備検討を行うために、各運転毎に測定されている反応度係数の成分分離および海外高速炉における安全特性試験の調査を行うものである。

(1) 出力係数の成分分離のための計算

「常陽」では、各運転サイクル毎の起動時および停止時に出力係数の測定が行われている。しかし、測定される物理量には、原子炉出力の変化に伴う反応度の変化量（出力係数）のほかに、燃料の挙動、集合体の変形、炉内構造物（炉心支持板等）の熱膨張の影響等、さまざまな要因が含まれている。これは、各運転サイクルの起動時と停止時とで出力係数のヒステリシスが見られていることでも明らかであり、下記の各要因の成分分離を行うことが必要である。

- a) ドップラー反応度
- b) 燃料の膨張
- c) 冷却材の密度変化
- d) 構造物（被覆管およびラッパ管）の膨張
- e) 炉心支持板の膨張
- f) 制御棒と炉心の相対変位
- g) 炉心変形

本検討では、支配要因を明確にするためにa)～e)について評価し、特にドップラー反応度および燃料の膨張を中心に検討した。燃料の膨張については、燃料ピンの照射履歴を考慮した燃料挙動解析を行い温度評価に反映させた。なお、f)については半定量的に評価した。

(2) 海外高速炉における安全特性試験の調査

E B R - IIについて、湾曲反応度の分離に着目した調査を行った。

2. 出力係数の成分分離

2.1 検討内容

本検討では、出力係数の支配要因を明確にするために下記のa)～e)について評価し、特にドップラー反応度および燃料の膨張に着目して検討した。

- a) ドップラー反応度
- b) 燃料の膨張
- c) 冷却材の密度変化
- d) 構造材（被覆管およびラッパ管）の膨張
- e) 炉心支持板の膨張
- f) 制御棒と炉心の相対変位
- g) 炉心変形

出力係数の成分分離の検討フローを図2.1-1 に示す。対象とするサイクルの反応度係数の解析および燃料ピンの温度解析を行った。燃料集合体の温度評価では、ドライバー燃料1体毎の照射履歴（出力履歴、中性子束履歴等）を考慮した燃料挙動解析を行い、燃料のドップラー反応度および膨張、冷却材の密度変化、構造材の膨張に反映させ出力係数を評価した。また、本検討では等温係数についても評価した。なお、炉心の燃料組成、出力履歴等については、運転監視コード”MAGI”の記録計算結果を使用した。

出力係数の評価は、燃料の照射挙動を明確化するために、下記に示す未燃焼炉心および平衡サイクル炉心を対象とした。炉心配置を図2.1-2 および図2.1-3 に示す。

a) 第0サイクル炉心（出力上昇試験炉心）

未燃焼炉心

- | | |
|-------------|---------|
| ・ 炉心燃料集合体 | 64体 |
| ・ B型特殊燃料集合体 | 2体 |
| ・ 特殊反射体 | 1体 |
| ・ 制御棒 | 6体（第3列） |

b) 第 2 7 サイクル炉心

平衡サイクル

・ 炉心燃料集合体	64体
・ B 型特殊燃料集合体	1体
・ C 型特殊燃料集合体	2体
・ 特殊反射体	8体
・ 制御棒	5体（第 3 列）、1 体（第 5 列）

第 0 サイクル炉心および第 2 7 サイクル炉心の出力係数については、以下の資料による。

- ・ PNC SN941 83-92
- ・ 技-4-306、技-4-307、技-5-65

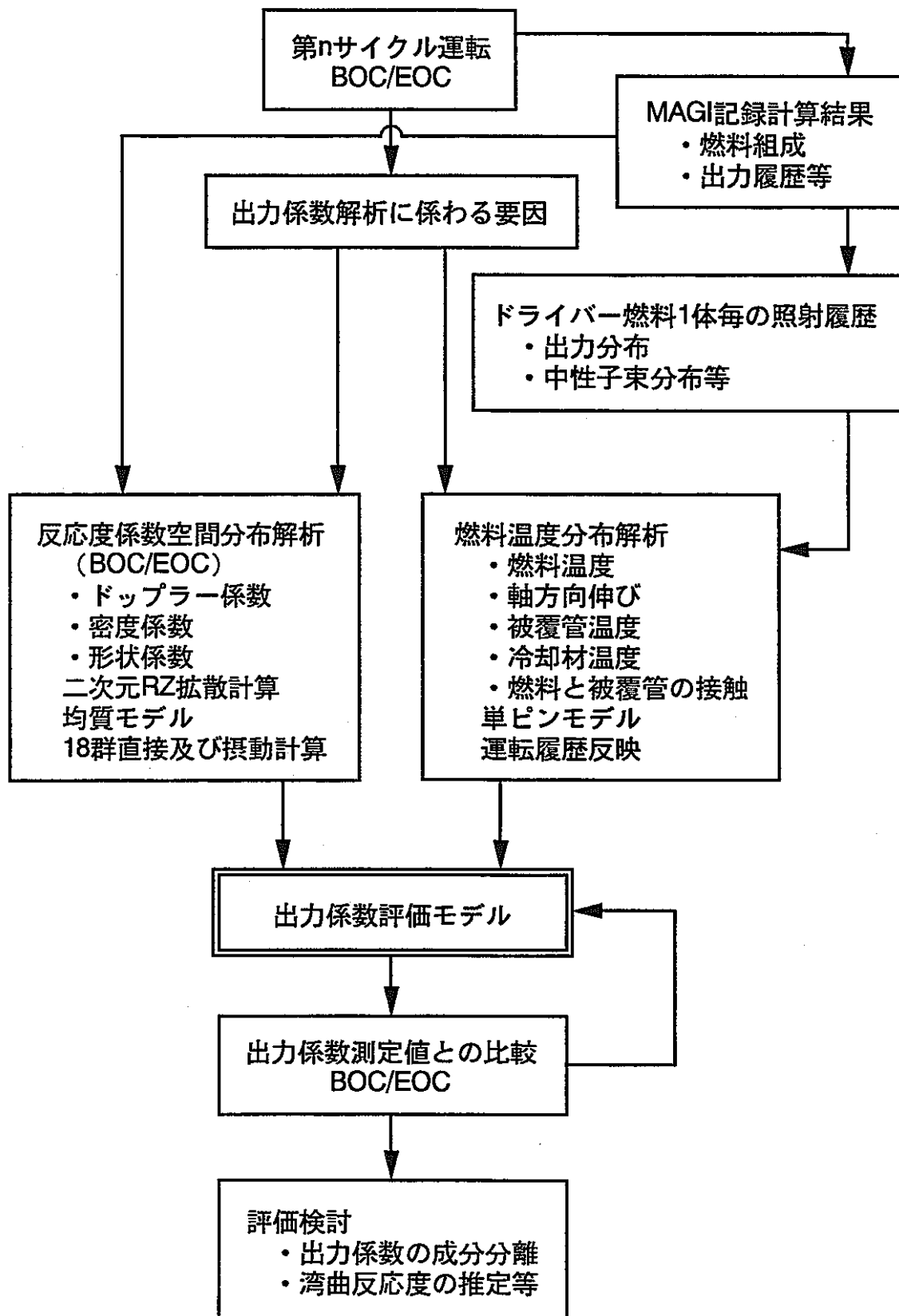
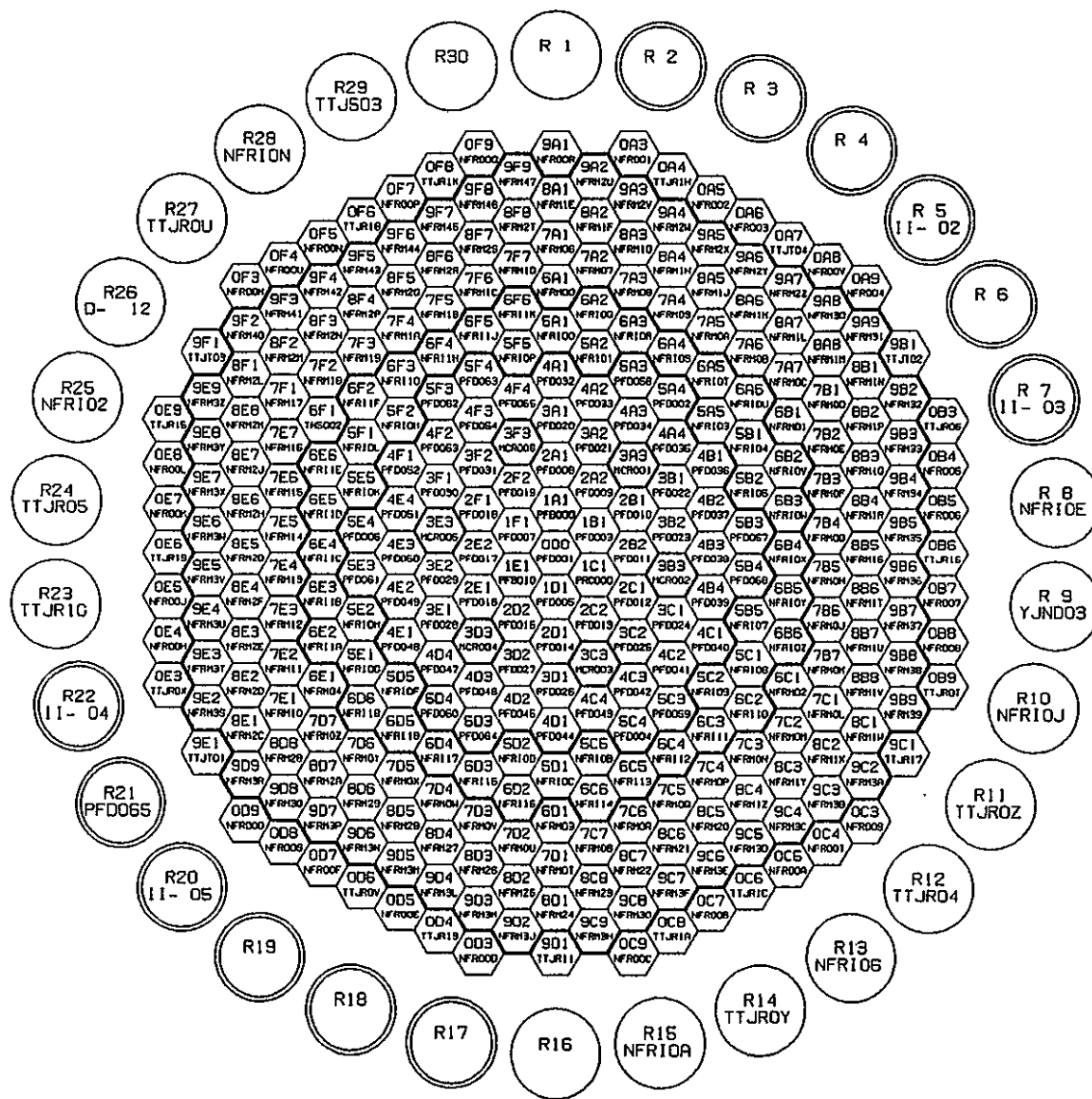


図2.1-1 出力係数成分分離の検討フロー



	炉 心	ラック
炉 心 燃 料	64	1
内側反射体	48	6
外側反射体〔A〕	143	0
外側反射体〔B〕	48	12
制 御 棒	6	1
中 性 子 源	1	0
特殊燃料 A	0	0
特殊燃料 B	2	0
特殊燃料 C	0	0
特殊反射体	1	0
I N T A	0	0

図2.1-2 第0サイクル出力上昇試験時の炉心配置

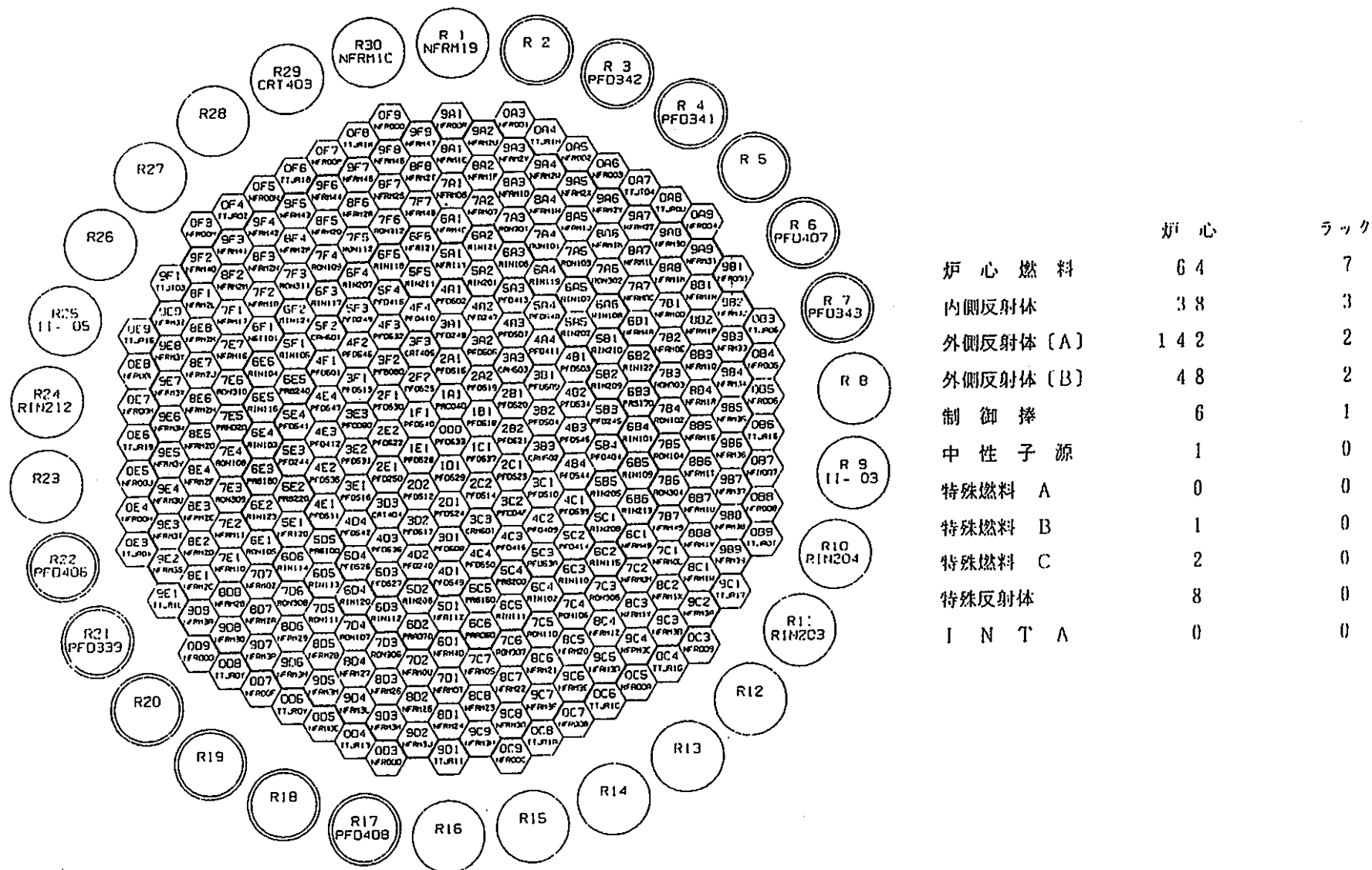


図2.1-3 第27サイクルの炉心配置

2.2 反応度係数評価

2.2.1 解析方法

反応度係数は、第0サイクルおよび第27サイクルのサイクル初期およびサイクル末期について解析した。

密度係数、ドップラー係数および形状係数の反応度係数は、二次元RZ拡散計算により行った。第0サイクル炉心および第27サイクル炉心の二次元RZモデルを図2.2-1 および図2.2-2 に示す。原子数密度は、運転監視コード"MA G I"の記録計算結果を使用した。従って、インシュレータペレットの高さは実際は1.2cmであるが、インシュレータペレットと端栓等をスメアし計算上は5cmとしてモデル化してある。

使用した群定数ライブラリーはJFS-3-J2 70群セットであり、これを18群に縮約して解析を行った。18群のエネルギーカットは下記に示すとおりである。なお、核分裂スペクトルはPu-239の値を使用した。

Group	Upper Energy	Lower Energy
1	10.0 (MeV)	6.0653 (MeV)
2	6.0653	3.6788
3	3.6788	2.2313
4	2.2313	1.3534
5	1.3534	0.82085
6	0.82085	0.38774
7	0.38774	0.18316
8	0.18316 (MeV)	86.517 (keV)
9	86.517 (keV)	40.868 (keV)
10	40.868	19.305
11	19.305	9.1188
12	9.1188	4.3074
13	4.3074	2.0347
14	2.0347 (keV)	961.12 (eV)
15	961.12 (eV)	454.00 (eV)
16	454.00	214.45
17	214.45	101.30
18	101.30	0.00001

二次元RZモデルにおける制御棒状態は、サイクル初期は部分挿入とし、サイクル末期は全引抜とした。サイクル初期の制御棒挿入量は、第0サイ

クルが7.5cm であり、第27サイクルが12.5cmである。この制御棒挿入量は過剰反応度がほぼゼロになるように設定した。第27サイクルの方が制御棒挿入量が多いのは、3E3の制御棒を5F2に移設しているために、制御棒反応度価値が小さくなっていることが主要因である。

炉心全体の密度係数、領域毎のドップラー係数および形状係数については、直接拡散計算により行った。なお、密度係数およびドップラー係数の空間分布については摂動計算により行った。

2.2.2 解析結果

第0サイクルの初期および末期の反応度係数計算結果を表2.1-1 及び表2.1-2 に示す。また、密度係数およびドップラー係数の空間分布を表2.1-3 ～表2.1-12に示す。

第27サイクルの初期および末期の反応度係数計算結果を表2.1-1 及び表2.1-2 に示す。また、密度係数およびドップラー係数の空間分布を表2.1-3 ～表2.1-12に示す。

第0サイクルおよび第27サイクルの両サイクルともに、サイクル初期と末期の反応度係数には若干の差が生じているがその差は小さい。「常陽」MK-II においては1サイクルの燃焼度が小さいために、燃料の1サイクルの燃焼が反応度係数に与える影響は小さいといえる。

第0サイクルと第27サイクルの比較では、燃料および冷却材の密度係数、形状係数の差は小さいが、構造材密度係数は約10% 小さくなっている。第27サイクルでは炉心に特殊反射体が多数（8体）装荷されているためと推定される。また、ドップラー係数については、第27サイクルは第0サイクルに比べて絶対値が約25% 小さくなっている。これは、制御棒挿入状態と燃料の燃焼によるものである。未燃焼炉心と平衡サイクル炉心の反応度係数の差、すなわち、燃料の燃焼に伴う反応度係数の変化は、密度係数および形状係数が小さく、ドップラー係数の絶対値の減少の効果が大きいといえる。

従って、このドップラー係数の絶対値の減少が、炉心燃料の燃焼（燃焼度増大）に伴う出力係数の減少の一つの要因といえる。

表2.2-1 第0サイクル初期の反応度係数

項 目	計算結果
密度係数 ($\Delta k/kk' / \Delta \rho / \rho$)	
燃料 [燃料部全体*1)]	0.620
構造材 [炉心全体]	0.173
冷却材 [炉心全体]	0.063
吸収材 [制御棒-B ₄ C]	-0.005
ドップラー係数 ($T \cdot dk/dT$)	
炉心燃料領域	-2.63×10^{-3}
特殊燃料領域	-7.08×10^{-5}
上部インシュレータ領域	-5.94×10^{-5}
下部インシュレータ領域	-1.51×10^{-4}
特殊反射体領域	-1.30×10^{-5}
軸方向上部反射体領域	-6.51×10^{-6}
軸方向下部反射体領域	-6.99×10^{-5}
径方向反射体領域	-4.60×10^{-4}
制御棒領域	-5.53×10^{-5}
形状係数 ($\Delta k/kk' / \Delta X/X$)	
軸方向	0.287
径方向	0.420

*1) 特殊燃料及びインシュレータペレットを含む。

表2.2-2 第0サイクル末期の反応度係数

項 目	計算結果
密度係数 ($\Delta k/kk' / \Delta \rho / \rho$)	
燃料 [燃料部全体*1)]	0.627
構造材 [炉心全体]	0.172
冷却材 [炉心全体]	0.061
吸収材 [制御棒 - B_4C]	-0.005
ドップラー係数 ($T \cdot dk/dT$)	
炉心燃料領域	-2.67×10^{-8}
特殊燃料領域	-7.21×10^{-5}
上部インシュレータ領域	-6.05×10^{-5}
下部インシュレータ領域	-1.52×10^{-4}
特殊反射体領域	-1.33×10^{-5}
軸方向上部反射体領域	-6.63×10^{-6}
軸方向下部反射体領域	-7.04×10^{-5}
径方向反射体領域	-4.65×10^{-4}
制御棒領域	-5.64×10^{-5}
形状係数 ($\Delta k/kk' / \Delta X/X$)	
軸方向	0.283
径方向	0.423

*1) 特殊燃料及びインシュレータペレットを含む。

表2.2-3 第0サイクル初期における燃料密度係数の空間分布

[($\Delta k/kk'$ / $\Delta \rho / \rho$) / cc]										
no.	 1....	 2....	 3....	 4....	 5....	 6....	 7....	 8....	 9....	 10....
15	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
14	8.500E-08	0.000E+00	1.031E-07	1.275E-07	1.182E-07	0.000E+00	8.378E-08	5.519E-08	3.211E-08	0.000E+00
13	2.544E-06	0.000E+00	2.488E-06	1.293E-06	2.241E-06	0.000E+00	1.704E-06	1.249E-06	8.980E-07	0.000E+00
12	3.444E-06	0.000E+00	3.328E-06	1.642E-06	2.953E-06	0.000E+00	2.233E-06	1.706E-06	1.260E-06	0.000E+00
11	4.350E-06	0.000E+00	4.194E-06	2.005E-06	3.716E-06	0.000E+00	2.817E-06	2.186E-06	1.635E-06	0.000E+00
10	5.145E-06	0.000E+00	4.959E-06	2.325E-06	4.399E-06	0.000E+00	3.340E-06	2.609E-06	1.963E-06	0.000E+00
9	5.717E-06	0.000E+00	5.510E-06	2.557E-06	4.893E-06	0.000E+00	3.719E-06	2.914E-06	2.198E-06	0.000E+00
8	5.982E-06	0.000E+00	5.765E-06	2.664E-06	5.123E-06	0.000E+00	3.896E-06	3.056E-06	2.309E-06	0.000E+00
7	5.898E-06	0.000E+00	5.685E-06	2.630E-06	5.052E-06	0.000E+00	3.843E-06	3.015E-06	2.278E-06	0.000E+00
6	5.477E-06	0.000E+00	5.280E-06	2.460E-06	4.690E-06	0.000E+00	3.569E-06	2.796E-06	2.110E-06	0.000E+00
5	4.781E-06	0.000E+00	4.610E-06	2.179E-06	4.090E-06	0.000E+00	3.114E-06	2.430E-06	1.828E-06	0.000E+00
4	3.914E-06	0.000E+00	3.778E-06	1.831E-06	3.343E-06	0.000E+00	2.550E-06	1.973E-06	1.468E-06	0.000E+00
3	3.017E-06	0.000E+00	2.936E-06	1.486E-06	2.583E-06	0.000E+00	1.993E-06	1.515E-06	1.092E-06	0.000E+00
2	1.055E-07	0.000E+00	1.014E-07	6.910E-08	9.930E-08	0.000E+00	8.705E-08	6.328E-08	4.043E-08	0.000E+00
1	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

no.	 11....	 12....
15	0.000E+00	0.000E+00
14	0.000E+00	0.000E+00
13	0.000E+00	0.000E+00
12	0.000E+00	0.000E+00
11	0.000E+00	0.000E+00
10	0.000E+00	0.000E+00
9	0.000E+00	0.000E+00
8	0.000E+00	0.000E+00
7	0.000E+00	0.000E+00
6	0.000E+00	0.000E+00
5	0.000E+00	0.000E+00
4	0.000E+00	0.000E+00
3	0.000E+00	0.000E+00
2	0.000E+00	0.000E+00
1	0.000E+00	0.000E+00

軸方向領域
 軸方向反射体部 ; 1, 15
 インシュレータペレット部 ; 2, 14
 燃料部 ; 3~13

径方向領域
 炉心燃料 ; 1, 3, 5, 7, 8, 9
 特殊反射体 ; 2
 特殊燃料-B ; 4
 制御棒 ; 6
 内側反射体 ; 10
 外側反射体-A ; 11
 外側反射体-B ; 12

表2.2-4 第0サイクル初期における構造材密度係数の空間分布

no.	1....	2....	3....	4....	5....	6....	7....	8....	9....	10....
15	4.833E-07	1.739E-07	4.560E-07	4.641E-07	3.680E-07	4.490E-08	2.343E-07	1.751E-07	1.293E-07	6.658E-08
14	4.695E-07	6.548E-07	5.328E-07	7.869E-07	5.789E-07	1.427E-07	4.209E-07	2.884E-07	1.934E-07	1.412E-07
13	2.428E-07	1.302E-06	2.723E-07	5.517E-07	3.219E-07	1.181E-06	2.482E-07	1.665E-07	1.237E-07	2.139E-07
12	1.298E-07	9.952E-07	1.396E-07	3.305E-07	1.787E-07	7.140E-07	1.369E-07	1.495E-07	1.594E-07	2.935E-07
11	-1.375E-08	5.602E-07	-7.050E-09	9.932E-08	5.390E-08	3.924E-07	5.315E-08	1.334E-07	1.913E-07	3.656E-07
10	-1.488E-07	1.460E-07	-1.401E-07	-1.057E-07	-5.005E-08	1.344E-07	-1.425E-08	1.198E-07	2.175E-07	4.245E-07
9	-2.479E-07	-1.594E-07	-2.365E-07	-2.530E-07	-1.232E-07	-4.518E-08	-6.150E-08	1.099E-07	2.354E-07	4.646E-07
8	-2.938E-07	-3.017E-07	-2.810E-07	-3.210E-07	-1.567E-07	-1.277E-07	-8.325E-08	1.050E-07	2.431E-07	4.821E-07
7	-2.784E-07	-2.566E-07	-2.664E-07	-2.990E-07	-1.462E-07	-1.032E-07	-7.665E-08	1.058E-07	2.396E-07	4.748E-07
6	-2.037E-07	-2.900E-08	-1.942E-07	-1.897E-07	-9.295E-08	2.578E-08	-4.230E-08	1.123E-07	2.249E-07	4.428E-07
5	-8.155E-08	3.466E-07	-7.530E-08	-7.450E-09	-4.200E-09	2.434E-07	1.610E-08	1.238E-07	1.997E-07	3.880E-07
4	6.480E-08	8.010E-07	7.140E-08	2.229E-07	1.065E-07	5.166E-07	9.215E-08	1.399E-07	1.645E-07	3.137E-07
3	1.947E-07	1.169E-06	2.171E-07	4.684E-07	2.153E-07	7.585E-07	1.755E-07	1.578E-07	1.138E-07	2.248E-07
2	2.916E-07	8.036E-07	2.792E-07	4.848E-07	2.644E-07	2.543E-07	2.227E-07	1.665E-07	1.161E-07	1.523E-07
1	3.106E-07	3.022E-07	3.010E-07	3.043E-07	2.542E-07	1.210E-07	1.932E-07	1.655E-07	1.294E-07	8.721E-08

no.	11....	12....
15	1.977E-08	6.869E-09
14	2.886E-08	9.703E-09
13	4.103E-08	1.309E-08
12	5.401E-08	1.675E-08
11	6.643E-08	2.035E-08
10	7.688E-08	2.349E-08
9	8.420E-08	2.578E-08
8	8.753E-08	2.692E-08
7	8.650E-08	2.677E-08
6	8.118E-08	2.537E-08
5	7.218E-08	2.294E-08
4	6.056E-08	1.981E-08
3	4.778E-08	1.636E-08
2	3.529E-08	1.291E-08
1	2.625E-08	9.842E-09

軸方向領域
 軸方向反射体部 ; 1, 15
 インシュレータペレット部 ; 2, 14
 燃料部 ; 3~1

径方向領域
 炉心燃料 ; 1, 3, 5, 7, 8, 9
 特殊反射体 ; 2
 特殊燃料-B ; 4
 制御棒 ; 6
 内側反射体 ; 10
 外側反射体-A ; 11
 外側反射体-B ; 12

表2.2-5 第0サイクル初期における冷却材密度係数の空間分布

										[($\Delta k/k'$ / $\Delta \rho / \rho$) / cc]	
no.	 1....	 2....	 3....	 4....	 5....	 6....	 7....	 8....	 9....	 10....	
15	1.084E-07	1.454E-07	9.928E-08	2.332E-07	7.452E-08	2.765E-08	4.486E-08	3.806E-08	2.971E-08	2.656E-08	
14	1.182E-07	8.616E-07	1.276E-07	3.107E-07	1.244E-07	1.023E-07	8.896E-08	6.971E-08	4.990E-08	5.698E-08	
13	1.363E-07	8.998E-07	1.459E-07	3.291E-07	1.503E-07	7.260E-07	1.169E-07	8.827E-08	6.818E-08	3.135E-08	
12	1.069E-07	7.347E-07	1.080E-07	2.440E-07	1.127E-07	4.890E-07	8.795E-08	9.108E-08	9.175E-08	4.365E-08	
11	6.500E-08	4.850E-07	6.505E-08	1.552E-07	8.080E-08	3.354E-07	6.870E-08	9.518E-08	1.140E-07	5.474E-08	
10	2.430E-08	2.432E-07	2.515E-08	7.505E-08	5.290E-08	2.058E-07	5.275E-08	9.880E-08	1.327E-07	6.380E-08	
9	-5.900E-09	6.362E-08	-4.150E-09	1.675E-08	3.280E-08	1.137E-07	4.125E-08	1.012E-07	1.458E-07	7.001E-08	
8	-1.970E-08	-2.005E-08	-1.745E-08	-9.950E-09	2.365E-08	7.142E-08	3.600E-08	1.022E-07	1.516E-07	7.278E-08	
7	-1.420E-08	7.600E-09	-1.220E-08	-1.501E-10	2.725E-08	8.503E-08	3.805E-08	1.019E-07	1.496E-07	7.178E-08	
6	1.030E-08	1.442E-07	1.140E-08	4.560E-08	4.355E-08	1.539E-07	4.750E-08	1.004E-07	1.399E-07	6.706E-08	
5	5.020E-08	3.695E-07	5.015E-08	1.219E-07	7.075E-08	2.703E-07	6.380E-08	9.815E-08	1.233E-07	5.893E-08	
4	9.820E-08	6.430E-07	9.870E-08	2.198E-07	1.054E-07	4.182E-07	8.620E-08	9.653E-08	1.010E-07	4.794E-08	
3	1.423E-07	8.717E-07	1.505E-07	3.329E-07	1.429E-07	5.559E-07	1.155E-07	9.917E-08	7.323E-08	3.474E-08	
2	3.215E-07	2.118E-07	3.070E-07	2.654E-07	2.858E-07	1.087E-06	2.402E-07	1.823E-07	1.323E-07	6.536E-08	
1	2.221E-07	1.747E-07	2.145E-07	1.032E-07	1.802E-07	4.913E-07	1.385E-07	1.162E-07	8.919E-08	3.716E-08	
no.	 11....	 12....									
15	1.915E-09	6.245E-10									
14	2.841E-09	8.810E-10									
13	4.156E-09	1.193E-09									
12	5.540E-09	1.526E-09									
11	6.875E-09	1.854E-09									
10	8.000E-09	2.139E-09									
9	8.780E-09	2.347E-09									
8	9.135E-09	2.451E-09									
7	9.025E-09	2.437E-09									
6	8.450E-09	2.309E-09									
5	7.475E-09	2.086E-09									
4	6.230E-09	1.801E-09									
3	4.865E-09	1.485E-09									
2	3.475E-09	1.162E-09									
1	2.540E-09	8.860E-10									

軸方向領域
 軸方向反射体部 ; 1, 15
 インシュレータペレット部 ; 2, 14
 燃料部 ; 3~1

径方向領域
 炉心燃料 ; 1, 3, 5, 7, 8, 9
 特殊反射体 ; 2
 特殊燃料-B ; 4
 制御棒 ; 6
 内側反射体 ; 10
 外側反射体-A ; 11
 外側反射体-B ; 12

表2.2-6 第0サイクル初期における吸収材 (B₄C) 密度係数の空間分布

no.	 1....	 2....	 3....	 4....	 5....	 6....	 7....	 8....	 9....	 10....
15	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-8.934E-07	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
14	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-1.752E-06	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
13	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
12	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
11	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
10	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
9	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
8	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
7	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
6	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
5	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
4	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
3	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

no.	 11....	 12....
15	0.000E+00	0.000E+00
14	0.000E+00	0.000E+00
13	0.000E+00	0.000E+00
12	0.000E+00	0.000E+00
11	0.000E+00	0.000E+00
10	0.000E+00	0.000E+00
9	0.000E+00	0.000E+00
8	0.000E+00	0.000E+00
7	0.000E+00	0.000E+00
6	0.000E+00	0.000E+00
5	0.000E+00	0.000E+00
4	0.000E+00	0.000E+00
3	0.000E+00	0.000E+00
2	0.000E+00	0.000E+00
1	0.000E+00	0.000E+00

軸方向領域
 軸方向反射体部 ; 1, 15
 インシュレータペレット部 ; 2, 14
 燃料部 ; 3~1

径方向領域
 炉心燃料 ; 1, 3, 5, 7, 8, 9
 特殊反射体 ; 2
 特殊燃料-B ; 4
 制御棒 ; 6
 内側反射体 ; 10
 外側反射体-A ; 11
 外側反射体-B ; 12

表2.2-7 第0サイクル初期におけるドップラー係数の空間分布

[(-T•dk/dT)/cc]										
no.	 1....	 2....	 3....	 4....	 5....	 6....	 7....	 8....	 9....	 10....
15	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
14	-4.178E-09	0.000E+00	-3.081E-09	-6.894E-10	-5.980E-10	0.000E+00	-5.615E-10	-2.537E-09	-3.573E-09	0.000E+00
13	-9.040E-09	0.000E+00	-7.498E-09	-3.223E-09	-2.590E-09	0.000E+00	-2.003E-09	-5.432E-09	-8.341E-09	0.000E+00
12	-1.187E-08	0.000E+00	-1.073E-08	-5.194E-09	-7.541E-09	0.000E+00	-6.064E-09	-6.984E-09	-1.062E-08	0.000E+00
11	-1.576E-08	0.000E+00	-1.481E-08	-7.607E-09	-1.227E-08	0.000E+00	-9.676E-09	-9.205E-09	-1.333E-08	0.000E+00
10	-1.962E-08	0.000E+00	-1.867E-08	-9.826E-09	-1.605E-08	0.000E+00	-1.253E-08	-1.129E-08	-1.586E-08	0.000E+00
9	-2.257E-08	0.000E+00	-2.154E-08	-1.145E-08	-1.868E-08	0.000E+00	-1.450E-08	-1.282E-08	-1.774E-08	0.000E+00
8	-2.406E-08	0.000E+00	-2.300E-08	-1.225E-08	-1.998E-08	0.000E+00	-1.548E-08	-1.360E-08	-1.871E-08	0.000E+00
7	-2.400E-08	0.000E+00	-2.293E-08	-1.220E-08	-1.994E-08	0.000E+00	-1.546E-08	-1.355E-08	-1.867E-08	0.000E+00
6	-2.262E-08	0.000E+00	-2.158E-08	-1.140E-08	-1.878E-08	0.000E+00	-1.458E-08	-1.279E-08	-1.770E-08	0.000E+00
5	-2.065E-08	0.000E+00	-1.962E-08	-1.022E-08	-1.711E-08	0.000E+00	-1.335E-08	-1.164E-08	-1.612E-08	0.000E+00
4	-1.971E-08	0.000E+00	-1.859E-08	-9.532E-09	-1.632E-08	0.000E+00	-1.290E-08	-1.100E-08	-1.463E-08	0.000E+00
3	-2.273E-08	0.000E+00	-2.151E-08	-1.141E-08	-1.931E-08	0.000E+00	-1.577E-08	-1.324E-08	-1.467E-08	0.000E+00
2	-1.243E-08	0.000E+00	-1.184E-08	-7.483E-09	-1.064E-08	0.000E+00	-8.831E-09	-7.466E-09	-6.816E-09	0.000E+00
1	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

no.	 11....	 12....
15	0.000E+00	0.000E+00
14	0.000E+00	0.000E+00
13	0.000E+00	0.000E+00
12	0.000E+00	0.000E+00
11	0.000E+00	0.000E+00
10	0.000E+00	0.000E+00
9	0.000E+00	0.000E+00
8	0.000E+00	0.000E+00
7	0.000E+00	0.000E+00
6	0.000E+00	0.000E+00
5	0.000E+00	0.000E+00
4	0.000E+00	0.000E+00
3	0.000E+00	0.000E+00
2	0.000E+00	0.000E+00
1	0.000E+00	0.000E+00

軸方向領域
 軸方向反射体部 ; 1, 15
 インシュレータベレット部 ; 2, 14
 燃料部 ; 3~1

径方向領域
 炉心燃料 ; 1, 3, 5, 7, 8, 9
 特殊反射体 ; 2
 特殊燃料-B ; 4
 制御棒 ; 6
 内側反射体 ; 10
 外側反射体-A ; 11
 外側反射体-B ; 12

表2.2-8 第0サイクル末期における燃料密度係数の空間分布

no.	 1....	 2....	 3....	 4....	 5....	 6....	 7....	 8....	 9....	 10....
15	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
14	7.880E-08	0.000E+00	9.590E-08	1.264E-07	1.090E-07	0.000E+00	9.573E-08	6.068E-08	3.514E-08	0.000E+00
13	2.674E-06	0.000E+00	2.609E-06	1.344E-06	2.298E-06	0.000E+00	1.762E-06	1.337E-06	9.628E-07	0.000E+00
12	3.541E-06	0.000E+00	3.420E-06	1.679E-06	3.028E-06	0.000E+00	2.308E-06	1.783E-06	1.322E-06	0.000E+00
11	4.399E-06	0.000E+00	4.243E-06	2.026E-06	3.767E-06	0.000E+00	2.872E-06	2.241E-06	1.682E-06	0.000E+00
10	5.132E-06	0.000E+00	4.949E-06	2.326E-06	4.401E-06	0.000E+00	3.358E-06	2.632E-06	1.987E-06	0.000E+00
9	5.635E-06	0.000E+00	5.435E-06	2.532E-06	4.837E-06	0.000E+00	3.692E-06	2.902E-06	2.196E-06	0.000E+00
8	5.837E-06	0.000E+00	5.630E-06	2.614E-06	5.013E-06	0.000E+00	3.828E-06	3.011E-06	2.282E-06	0.000E+00
7	5.708E-06	0.000E+00	5.506E-06	2.562E-06	4.902E-06	0.000E+00	3.745E-06	2.945E-06	2.232E-06	0.000E+00
6	5.266E-06	0.000E+00	5.080E-06	2.381E-06	4.521E-06	0.000E+00	3.454E-06	2.713E-06	2.053E-06	0.000E+00
5	4.574E-06	0.000E+00	4.413E-06	2.099E-06	3.922E-06	0.000E+00	2.998E-06	2.346E-06	1.768E-06	0.000E+00
4	3.731E-06	0.000E+00	3.604E-06	1.758E-06	3.195E-06	0.000E+00	2.446E-06	1.897E-06	1.415E-06	0.000E+00
3	2.870E-06	0.000E+00	2.795E-06	1.424E-06	2.463E-06	0.000E+00	1.907E-06	1.453E-06	1.049E-06	0.000E+00
2	1.036E-07	0.000E+00	9.940E-08	6.760E-08	9.712E-08	0.000E+00	8.528E-08	6.204E-08	3.992E-08	0.000E+00
1	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

$[(\Delta k/k' / \Delta \rho / \rho) / cc]$

no.	 11....	 12....
15	0.000E+00	0.000E+00
14	0.000E+00	0.000E+00
13	0.000E+00	0.000E+00
12	0.000E+00	0.000E+00
11	0.000E+00	0.000E+00
10	0.000E+00	0.000E+00
9	0.000E+00	0.000E+00
8	0.000E+00	0.000E+00
7	0.000E+00	0.000E+00
6	0.000E+00	0.000E+00
5	0.000E+00	0.000E+00
4	0.000E+00	0.000E+00
3	0.000E+00	0.000E+00
2	0.000E+00	0.000E+00
1	0.000E+00	0.000E+00

軸方向領域
 軸方向反射体部 ; 1, 15
 インシュレータペレット部 ; 2, 14
 燃料部 ; 3~1

径方向領域
 炉心燃料 ; 1, 3, 5, 7, 8, 9
 特殊反射体 ; 2
 特殊燃料-B ; 4
 制御棒 ; 6
 内側反射体 ; 10
 外側反射体-A ; 11
 外側反射体-B ; 12

表2.2-9 第0サイクル末期における構造材密度係数の空間分布

[($\Delta k/k'$ / $\Delta \rho / \rho$) / cc]										
no.	 1....	 2....	 3....	 4....	 5....	 6....	 7....	 8....	 9....	 10....
15	5.327E-07	1.922E-07	5.100E-07	5.421E-07	4.853E-07	8.690E-08	3.700E-07	2.236E-07	1.533E-07	7.569E-08
14	4.664E-07	6.589E-07	5.269E-07	7.992E-07	5.726E-07	7.944E-07	4.832E-07	3.200E-07	2.119E-07	1.532E-07
13	2.203E-07	1.237E-06	2.437E-07	5.010E-07	2.431E-07	8.269E-07	1.918E-07	1.678E-07	1.302E-07	2.262E-07
12	9.405E-08	8.795E-07	9.990E-08	2.621E-07	1.296E-07	5.714E-07	1.087E-07	1.463E-07	1.649E-07	3.047E-07
11	-5.020E-08	4.439E-07	-4.460E-08	3.855E-08	1.875E-08	3.036E-07	3.335E-08	1.286E-07	1.944E-07	3.734E-07
10	-1.774E-07	5.941E-08	-1.685E-07	-1.498E-07	-7.455E-08	7.786E-08	-2.845E-08	1.146E-07	2.179E-07	4.277E-07
9	-2.655E-07	-2.065E-07	-2.536E-07	-2.784E-07	-1.381E-07	-7.551E-08	-7.030E-08	1.051E-07	2.332E-07	4.630E-07
8	-3.008E-07	-3.133E-07	-2.877E-07	-3.300E-07	-1.637E-07	-1.374E-07	-8.740E-08	1.006E-07	2.387E-07	4.761E-07
7	-2.778E-07	-2.449E-07	-2.656E-07	-2.970E-07	-1.479E-07	-9.984E-08	-7.760E-08	1.019E-07	2.336E-07	4.655E-07
6	-1.999E-07	-1.012E-08	-1.905E-07	-1.834E-07	-9.235E-08	3.339E-08	-4.190E-08	1.086E-07	2.182E-07	4.316E-07
5	-7.890E-08	3.567E-07	-7.270E-08	-3.850E-09	-4.450E-09	2.465E-07	1.590E-08	1.198E-07	1.930E-07	3.765E-07
4	6.285E-08	7.900E-07	6.940E-08	2.182E-07	1.028E-07	5.082E-07	8.955E-08	1.351E-07	1.585E-07	3.035E-07
3	1.871E-07	1.134E-06	2.088E-07	4.520E-07	2.071E-07	7.362E-07	1.694E-07	1.522E-07	1.096E-07	2.169E-07
2	2.805E-07	7.733E-07	2.684E-07	4.662E-07	2.542E-07	2.461E-07	2.146E-07	1.604E-07	1.120E-07	1.470E-07
1	2.984E-07	2.900E-07	2.892E-07	2.918E-07	2.441E-07	1.167E-07	1.857E-07	1.592E-07	1.246E-07	8.398E-08

no.	 11....	 12....
15	2.162E-08	7.366E-09
14	3.089E-08	1.030E-08
13	4.318E-08	1.373E-08
12	5.602E-08	1.739E-08
11	6.805E-08	2.091E-08
10	7.790E-08	2.391E-08
9	8.451E-08	2.602E-08
8	8.716E-08	2.697E-08
7	8.554E-08	2.664E-08
6	7.982E-08	2.510E-08
5	7.064E-08	2.258E-08
4	5.902E-08	1.941E-08
3	4.642E-08	1.597E-08
2	3.418E-08	1.256E-08
1	2.537E-08	9.550E-09

軸方向領域
 軸方向反射体部 ; 1, 15
 インシュレータペレット部 ; 2, 14
 燃料部 ; 3~1

径方向領域
 炉心燃料 ; 1, 3, 5, 7, 8, 9
 特殊反射体 ; 2
 特殊燃料-B ; 4
 制御棒 ; 6
 内側反射体 ; 10
 外側反射体-A ; 11
 外側反射体-B ; 12

表2.2-10 第0サイクル末期における冷却材密度係数の空間分布

no.	1....	2....	3....	4....	5....	6....	7....	8....	9....	10....
15	1.220E-07	1.707E-07	1.137E-07	2.748E-07	1.010E-07	6.240E-08	7.645E-08	5.022E-08	3.570E-08	3.035E-08
14	1.236E-07	8.834E-07	1.330E-07	3.235E-07	1.310E-07	4.659E-07	1.119E-07	8.062E-08	5.583E-08	6.210E-08
13	1.340E-07	8.699E-07	1.423E-07	3.179E-07	1.340E-07	5.513E-07	1.068E-07	9.328E-08	7.318E-08	3.328E-08
12	9.830E-08	6.705E-07	9.880E-08	2.219E-07	1.037E-07	4.303E-07	8.480E-08	9.344E-08	9.617E-08	4.542E-08
11	5.415E-08	4.172E-07	5.425E-08	1.324E-07	7.240E-08	2.937E-07	6.515E-08	9.559E-08	1.169E-07	5.599E-08
10	1.435E-08	1.908E-07	1.550E-08	5.635E-08	4.535E-08	1.765E-07	4.890E-08	9.780E-08	1.337E-07	6.433E-08
9	-1.340E-08	3.331E-08	-1.125E-08	4.051E-09	2.680E-08	9.626E-08	3.785E-08	9.920E-08	1.449E-07	6.979E-08
8	-2.445E-08	-2.999E-08	-2.190E-08	-1.685E-08	1.935E-08	6.384E-08	3.330E-08	9.960E-08	1.492E-07	7.188E-08
7	-1.695E-08	1.097E-08	-1.475E-08	-3.100E-09	2.415E-08	8.378E-08	3.595E-08	9.885E-08	1.460E-07	7.037E-08
6	8.401E-09	1.513E-07	9.600E-09	4.400E-08	4.095E-08	1.544E-07	4.555E-08	9.710E-08	1.357E-07	6.534E-08
5	4.775E-08	3.707E-07	4.785E-08	1.188E-07	6.775E-08	2.679E-07	6.155E-08	9.476E-08	1.190E-07	5.715E-08
4	9.410E-08	6.308E-07	9.475E-08	2.128E-07	1.012E-07	4.089E-07	8.315E-08	9.295E-08	9.714E-08	4.634E-08
3	1.361E-07	8.441E-07	1.441E-07	3.203E-07	1.370E-07	5.383E-07	1.110E-07	9.535E-08	7.033E-08	3.349E-08
2	3.081E-07	2.034E-07	2.942E-07	2.546E-07	2.739E-07	1.049E-06	2.309E-07	1.751E-07	1.272E-07	6.297E-08
1	2.128E-07	1.672E-07	2.055E-07	9.874E-08	1.727E-07	4.729E-07	1.328E-07	1.115E-07	8.573E-08	3.572E-08

no.	11....	12....
15	2.094E-09	6.694E-10
14	3.038E-09	9.340E-10
13	4.369E-09	1.251E-09
12	5.738E-09	1.583E-09
11	7.025E-09	1.904E-09
10	8.085E-09	2.177E-09
9	8.795E-09	2.368E-09
8	9.080E-09	2.454E-09
7	8.905E-09	2.424E-09
6	8.290E-09	2.283E-09
5	7.300E-09	2.053E-09
4	6.060E-09	1.764E-09
3	4.715E-09	1.450E-09
2	3.359E-09	1.131E-09
1	2.449E-09	8.590E-10

軸方向領域
 軸方向反射体部 ; 1, 15
 インシュレータペレット部 ; 2, 14
 燃料部 ; 3~1

径方向領域
 炉心燃料 ; 1, 3, 5, 7, 8, 9
 特殊反射体 ; 2
 特殊燃料-B ; 4
 制御棒 ; 6
 内側反射体 ; 10
 外側反射体-A ; 11
 外側反射体-B ; 12

表2.2-11 第0サイクル末期における吸収材 (B₄C) 密度係数の空間分布

										[($\Delta k/kk'$ / $\Delta \rho / \rho$) / cc]	
no.	 1....	 2....	 3....	 4....	 5....	 6....	 7....	 8....	 9....	 10....	
15	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-1.506E-06	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	
14	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	
13	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	
12	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	
11	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	
10	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	
9	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	
8	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	
7	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	
6	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	
5	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	
4	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	
3	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	
2	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	
1	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	

no.	 11....	 12....
15	0.000E+00	0.000E+00
14	0.000E+00	0.000E+00
13	0.000E+00	0.000E+00
12	0.000E+00	0.000E+00
11	0.000E+00	0.000E+00
10	0.000E+00	0.000E+00
9	0.000E+00	0.000E+00
8	0.000E+00	0.000E+00
7	0.000E+00	0.000E+00
6	0.000E+00	0.000E+00
5	0.000E+00	0.000E+00
4	0.000E+00	0.000E+00
3	0.000E+00	0.000E+00
2	0.000E+00	0.000E+00
1	0.000E+00	0.000E+00

軸方向領域
 軸方向反射体部 ; 1, 15
 インシュレータペレット部 ; 2, 14
 燃料部 ; 3~1

径方向領域
 炉心燃料 ; 1, 3, 5, 7, 8, 9
 特殊反射体 ; 2
 特殊燃料-B ; 4
 制御棒 ; 6
 内側反射体 ; 10
 外側反射体-A ; 11
 外側反射体-B ; 12

表2.2-12 第0サイクル末期におけるドップラー係数の空間分布

[(-T·dk/dT)/cc]										
no.	 1....	 2....	 3....	 4....	 5....	 6....	 7....	 8....	 9....	 10....
15	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
14	-6.030E-09	0.000E+00	-4.934E-09	-1.669E-09	-2.525E-09	0.000E+00	-2.139E-09	-3.512E-09	-4.235E-09	0.000E+00
13	-1.208E-08	0.000E+00	-1.085E-08	-5.228E-09	-8.066E-09	0.000E+00	-6.686E-09	-7.209E-09	-9.488E-09	0.000E+00
12	-1.438E-08	0.000E+00	-1.346E-08	-6.804E-09	-1.126E-08	0.000E+00	-8.920E-09	-8.274E-09	-1.157E-08	0.000E+00
11	-1.766E-08	0.000E+00	-1.678E-08	-8.746E-09	-1.449E-08	0.000E+00	-1.131E-08	-1.008E-08	-1.405E-08	0.000E+00
10	-2.089E-08	0.000E+00	-1.994E-08	-1.056E-08	-1.733E-08	0.000E+00	-1.346E-08	-1.183E-08	-1.631E-08	0.000E+00
9	-2.326E-08	0.000E+00	-2.223E-08	-1.185E-08	-1.934E-08	0.000E+00	-1.498E-08	-1.309E-08	-1.794E-08	0.000E+00
8	-2.430E-08	0.000E+00	-2.325E-08	-1.242E-08	-2.023E-08	0.000E+00	-1.566E-08	-1.365E-08	-1.868E-08	0.000E+00
7	-2.390E-08	0.000E+00	-2.285E-08	-1.218E-08	-1.989E-08	0.000E+00	-1.542E-08	-1.346E-08	-1.844E-08	0.000E+00
6	-2.228E-08	0.000E+00	-2.127E-08	-1.126E-08	-1.854E-08	0.000E+00	-1.439E-08	-1.258E-08	-1.734E-08	0.000E+00
5	-2.017E-08	0.000E+00	-1.918E-08	-1.002E-08	-1.675E-08	0.000E+00	-1.307E-08	-1.138E-08	-1.569E-08	0.000E+00
4	-1.908E-08	0.000E+00	-1.802E-08	-9.263E-09	-1.582E-08	0.000E+00	-1.252E-08	-1.067E-08	-1.414E-08	0.000E+00
3	-2.178E-08	0.000E+00	-2.062E-08	-1.097E-08	-1.851E-08	0.000E+00	-1.513E-08	-1.271E-08	-1.409E-08	0.000E+00
2	-1.197E-08	0.000E+00	-1.140E-08	-7.201E-09	-1.024E-08	0.000E+00	-8.511E-09	-7.200E-09	-6.581E-09	0.000E+00
1	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

no.	 11....	 12....
15	0.000E+00	0.000E+00
14	0.000E+00	0.000E+00
13	0.000E+00	0.000E+00
12	0.000E+00	0.000E+00
11	0.000E+00	0.000E+00
10	0.000E+00	0.000E+00
9	0.000E+00	0.000E+00
8	0.000E+00	0.000E+00
7	0.000E+00	0.000E+00
6	0.000E+00	0.000E+00
5	0.000E+00	0.000E+00
4	0.000E+00	0.000E+00
3	0.000E+00	0.000E+00
2	0.000E+00	0.000E+00
1	0.000E+00	0.000E+00

軸方向領域
 軸方向反射体部 ; 1, 15
 インシュレータペレット部 ; 2, 14
 燃料部 ; 3~1

径方向領域
 炉心燃料 ; 1, 3, 5, 7, 8, 9
 特殊反射体 ; 2
 特殊燃料-B ; 4
 制御棒 ; 6
 内側反射体 ; 10
 外側反射体-A ; 11
 外側反射体-B ; 12

表2.2-13 第27サイクル初期の反応度係数

項 目	計算結果
密度係数 ($\Delta k/kk' / \Delta \rho / \rho$)	
燃料 [燃料部全体*1]	0.640
構造材 [炉心全体]	0.152
冷却材 [炉心全体]	0.062
吸収材 [制御棒-B ₄ C]	-0.012
ドップラー係数 ($T \cdot dk/dT$)	
炉心燃料領域	-1.95×10^{-3}
特殊燃料領域	-7.40×10^{-5}
上部インシュレータ領域	-2.30×10^{-5}
下部インシュレータ領域	-1.40×10^{-4}
特殊反射体領域	-6.58×10^{-5}
軸方向上部反射体領域	-3.29×10^{-6}
軸方向下部反射体領域	-6.91×10^{-5}
径方向反射体領域	-3.27×10^{-4}
制御棒領域	-1.07×10^{-5}
形状係数 ($\Delta k/kk' / \Delta X/X$)	
軸方向	0.279
径方向	0.416

*1) 特殊燃料及びインシュレータペレットを含む。

表2.2-14 第27サイクル末期の反応度係数

項 目	計算結果
密度係数 ($\Delta k/kk' / \Delta \rho / \rho$)	
燃料 [燃料部全体*1)]	0.634
構造材 [炉心全体]	0.154
冷却材 [炉心全体]	0.063
吸収材 [制御棒-B ₄ C]	-0.008
ドップラー係数 ($T \cdot dk/dT$)	
炉心燃料領域	-2.05×10^{-3}
特殊燃料領域	-7.58×10^{-5}
上部インシュレータ領域	-2.72×10^{-5}
下部インシュレータ領域	-1.37×10^{-4}
特殊反射体領域	-6.92×10^{-5}
軸方向上部反射体領域	-3.30×10^{-6}
軸方向下部反射体領域	-6.68×10^{-5}
径方向反射体領域	-3.45×10^{-4}
制御棒領域	-1.07×10^{-5}
形状係数 ($\Delta k/kk' / \Delta X/X$)	
軸方向	0.279
径方向	0.416

*1) 特殊燃料及びインシュレータペレットを含む。

表2.2-15 第27サイクル初期における燃料密度係数の空間分布

[($\Delta k/k'$ / $\Delta \rho / \rho$) / cc]										
no.	 1....	 2....	 3....	 4....	 5....	 6....	 7....	 8....	 9....	 10....
15	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
14	1.501E-07	1.406E-07	0.000E+00	1.263E-07	1.057E-07	6.064E-08	5.676E-08	0.000E+00	4.723E-08	3.224E-08
13	3.292E-06	3.002E-06	0.000E+00	2.335E-06	1.809E-06	8.053E-07	8.396E-07	0.000E+00	9.751E-07	6.897E-07
12	4.441E-06	4.068E-06	0.000E+00	3.152E-06	2.468E-06	1.013E-06	1.053E-06	0.000E+00	1.437E-06	9.966E-07
11	5.640E-06	5.171E-06	0.000E+00	3.990E-06	3.104E-06	1.166E-06	1.201E-06	0.000E+00	1.814E-06	1.300E-06
10	6.703E-06	6.146E-06	0.000E+00	4.735E-06	3.691E-06	1.333E-06	1.372E-06	0.000E+00	2.158E-06	1.565E-06
9	7.469E-06	6.849E-06	0.000E+00	5.275E-06	4.119E-06	1.454E-06	1.497E-06	0.000E+00	2.412E-06	1.759E-06
8	7.823E-06	7.175E-06	0.000E+00	5.529E-06	4.322E-06	1.511E-06	1.556E-06	0.000E+00	2.537E-06	1.856E-06
7	7.708E-06	7.071E-06	0.000E+00	5.454E-06	4.267E-06	1.495E-06	1.539E-06	0.000E+00	2.512E-06	1.841E-06
6	7.137E-06	6.549E-06	0.000E+00	5.059E-06	3.960E-06	1.405E-06	1.445E-06	0.000E+00	2.340E-06	1.716E-06
5	6.195E-06	5.685E-06	0.000E+00	4.401E-06	3.443E-06	1.254E-06	1.288E-06	0.000E+00	2.046E-06	1.498E-06
4	5.031E-06	4.616E-06	0.000E+00	3.581E-06	2.791E-06	1.063E-06	1.088E-06	0.000E+00	1.675E-06	1.218E-06
3	3.865E-06	3.541E-06	0.000E+00	2.756E-06	2.114E-06	8.466E-07	8.601E-07	0.000E+00	1.308E-06	9.175E-07
2	1.503E-07	1.317E-07	0.000E+00	1.337E-07	8.523E-08	2.561E-08	3.113E-08	0.000E+00	8.127E-08	4.689E-08
1	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

no.	 11....	 12....	 13....	 14....	 15....
15	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
14	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
13	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
12	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
11	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
10	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
9	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
8	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
7	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
6	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
5	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
4	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
3	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

軸方向領域
 軸方向反射体部 ; 1, 15
 インシュレータペレット部 ; 2, 14
 燃料部 ; 3~1

径方向領域
 炉心燃料 ; 1, 2, 4, 5, 9, 10
 特殊反射体 ; 3, 12
 特殊燃料-B ; 6
 特殊燃料-C ; 7
 制御棒 ; 8, 11
 内側反射体 ; 13
 外側反射体-A ; 14
 外側反射体-B ; 15

表2.2-16 第27サイクル初期における構造材密度係数の空間分布

no.	1....	2....	3....	4....	5....	6....	7....	8....	9....	10....
15	4.573E-07	4.385E-07	4.422E-07	3.806E-07	3.122E-07	2.815E-07	2.621E-07	4.325E-08	1.339E-07	9.977E-08
14	7.434E-07	6.887E-07	7.541E-07	5.954E-07	4.948E-07	5.375E-07	4.468E-07	1.105E-07	2.208E-07	1.535E-07
13	3.748E-07	3.475E-07	1.505E-06	3.109E-07	2.925E-07	4.945E-07	3.844E-07	1.785E-07	1.373E-07	1.064E-07
12	1.979E-07	2.062E-07	1.081E-06	2.160E-07	2.478E-07	4.395E-07	3.432E-07	1.573E-07	1.616E-07	1.423E-07
11	1.035E-08	4.935E-08	5.782E-07	1.079E-07	1.854E-07	3.224E-07	2.451E-07	2.388E-07	1.391E-07	1.715E-07
10	-1.582E-07	-9.295E-08	1.195E-07	1.310E-08	1.465E-07	2.666E-07	2.050E-07	1.381E-07	1.298E-07	1.957E-07
9	-2.812E-07	-1.971E-07	-2.169E-07	-5.610E-08	1.178E-07	2.249E-07	1.756E-07	6.921E-08	1.240E-07	2.126E-07
8	-3.383E-07	-2.462E-07	-3.771E-07	-8.985E-08	1.022E-07	2.028E-07	1.597E-07	3.541E-08	1.202E-07	2.199E-07
7	-3.184E-07	-2.310E-07	-3.318E-07	-8.315E-08	1.018E-07	2.021E-07	1.585E-07	3.953E-08	1.184E-07	2.164E-07
6	-2.207E-07	-1.512E-07	-7.880E-08	-3.600E-08	1.157E-07	2.220E-07	1.713E-07	7.985E-08	1.184E-07	2.020E-07
5	-5.470E-08	-1.445E-08	3.595E-07	4.630E-08	1.417E-07	2.583E-07	1.951E-07	1.490E-07	1.198E-07	1.776E-07
4	1.604E-07	1.634E-07	9.396E-07	1.543E-07	1.738E-07	3.015E-07	2.226E-07	2.311E-07	1.227E-07	1.439E-07
3	3.881E-07	3.510E-07	1.577E-06	2.711E-07	1.990E-07	3.148E-07	2.262E-07	2.874E-07	1.303E-07	9.705E-08
2	3.701E-07	3.269E-07	4.798E-07	3.056E-07	2.042E-07	2.952E-07	2.866E-07	1.737E-07	1.765E-07	1.044E-07
1	3.354E-07	3.235E-07	3.747E-07	2.800E-07	2.274E-07	2.308E-07	-2.873E-08	2.324E-07	1.919E-07	1.244E-07

no.	11....	12....	13....	14....	15....
15	1.885E-08	7.572E-08	4.428E-08	1.376E-08	4.697E-09
14	4.325E-08	1.614E-07	8.685E-08	2.094E-08	6.786E-09
13	7.795E-08	2.738E-07	1.435E-07	3.055E-08	9.358E-09
12	6.180E-08	4.052E-07	2.080E-07	4.133E-08	1.224E-08
11	1.205E-07	4.708E-07	2.615E-07	5.189E-08	1.518E-08
10	1.029E-07	5.345E-07	3.057E-07	6.094E-08	1.785E-08
9	9.051E-08	5.784E-07	3.364E-07	6.747E-08	1.990E-08
8	8.370E-08	5.974E-07	3.505E-07	7.078E-08	2.107E-08
7	8.283E-08	5.893E-07	3.464E-07	7.053E-08	2.121E-08
6	8.710E-08	5.539E-07	3.243E-07	6.678E-08	2.032E-08
5	9.413E-08	4.928E-07	2.859E-07	5.999E-08	1.856E-08
4	9.855E-08	4.064E-07	2.341E-07	5.097E-08	1.617E-08
3	8.083E-08	2.909E-07	1.736E-07	4.087E-08	1.347E-08
2	5.136E-08	2.121E-07	1.169E-07	3.108E-08	1.074E-08
1	9.451E-08	1.424E-07	7.694E-08	2.311E-08	8.203E-09

軸方向領域
 軸方向反射体部 ; 1, 15
 インシュレータペレット部 ; 2, 14
 燃料部 ; 3~1

径方向領域
 炉心燃料 ; 1, 2, 4, 5, 9, 10
 特殊反射体 ; 3, 12
 特殊燃料-B ; 6
 特殊燃料-C ; 7
 制御棒 ; 8, 11
 内側反射体 ; 13
 外側反射体-A ; 14
 外側反射体-B ; 15

表2.2-17 第27サイクル初期における冷却材密度係数の空間分布

										[($\Delta k/k'$ / $\Delta \rho / \rho$) / cc]	
no.	 1....	 2....	 3....	 4....	 5....	 6....	 7....	 8....	 9....	 10....	
15	1.072E-07	1.013E-07	8.849E-08	8.315E-08	6.345E-08	1.326E-07	1.486E-07	2.925E-08	2.634E-08	2.012E-08	
14	1.874E-07	1.720E-07	5.205E-07	1.406E-07	1.068E-07	1.794E-07	1.720E-07	8.045E-08	4.669E-08	3.321E-08	
13	2.115E-07	1.928E-07	3.961E-07	1.614E-07	1.343E-07	2.353E-07	2.321E-07	1.411E-07	6.309E-08	4.996E-08	
12	1.563E-07	1.521E-07	3.194E-07	1.375E-07	1.298E-07	2.248E-07	2.239E-07	1.374E-07	8.294E-08	7.290E-08	
11	9.805E-08	1.058E-07	2.237E-07	1.100E-07	1.226E-07	1.958E-07	1.972E-07	8.435E-07	8.592E-08	9.493E-08	
10	4.570E-08	6.355E-08	1.352E-07	8.630E-08	1.219E-07	1.877E-07	1.942E-07	5.627E-07	9.223E-08	1.129E-07	
9	7.449E-09	3.250E-08	7.005E-08	6.875E-08	1.202E-07	1.794E-07	1.898E-07	3.621E-07	9.669E-08	1.254E-07	
8	-1.015E-08	1.805E-08	3.908E-08	6.020E-08	1.188E-07	1.745E-07	1.867E-07	2.628E-07	9.860E-08	1.312E-07	
7	-3.301E-09	2.315E-08	4.844E-08	6.230E-08	1.185E-07	1.743E-07	1.861E-07	2.773E-07	9.780E-08	1.299E-07	
6	2.850E-08	4.830E-08	9.905E-08	7.545E-08	1.193E-07	1.792E-07	1.884E-07	4.029E-07	9.457E-08	1.213E-07	
5	8.310E-08	9.180E-08	1.870E-07	9.875E-08	1.215E-07	1.884E-07	1.934E-07	6.206E-07	8.946E-08	1.066E-07	
4	1.556E-07	1.499E-07	3.045E-07	1.306E-07	1.246E-07	1.997E-07	1.993E-07	8.916E-07	8.377E-08	8.678E-08	
3	2.385E-07	2.167E-07	4.383E-07	1.701E-07	1.269E-07	1.991E-07	1.928E-07	1.126E-06	8.226E-08	6.168E-08	
2	3.917E-07	3.498E-07	9.775E-07	3.262E-07	2.238E-07	1.326E-07	1.580E-07	7.271E-07	1.826E-07	1.154E-07	
1	2.393E-07	2.306E-07	1.648E-07	1.989E-07	1.629E-07	1.046E-07	1.200E-08	1.764E-07	1.308E-07	8.495E-08	

no.	 11....	 12....	 13....	 14....	 15....	
15	1.307E-08	9.625E-09	1.600E-08	1.148E-09	4.312E-10	軸方向領域
14	3.285E-08	2.275E-08	1.087E-08	1.814E-09	6.244E-10	軸方向反射体部 ; 1, 15
13	6.665E-08	3.962E-08	1.897E-08	2.716E-09	8.590E-10	インシュレータペレット部 ; 2, 14
12	5.825E-08	6.187E-08	2.896E-08	3.763E-09	1.122E-09	燃料部 ; 3~1
11	4.379E-07	7.625E-08	3.805E-08	4.813E-09	1.389E-09	
10	4.053E-07	8.824E-08	4.550E-08	5.725E-09	1.632E-09	径方向領域
9	3.795E-07	9.648E-08	5.066E-08	6.385E-09	1.818E-09	炉心燃料 ; 1, 2, 4, 5, 9, 10
8	3.646E-07	1.003E-07	5.313E-08	6.720E-09	1.923E-09	特殊反射体 ; 3, 12
7	3.626E-07	9.938E-08	5.270E-08	6.705E-09	1.935E-09	特殊燃料-B ; 6
6	3.719E-07	9.383E-08	4.945E-08	6.340E-09	1.854E-09	特殊燃料-C ; 7
5	3.870E-07	8.401E-08	4.367E-08	5.670E-09	1.691E-09	制御棒 ; 8, 11
4	3.962E-07	7.020E-08	3.583E-08	4.787E-09	1.474E-09	内側反射体 ; 13
3	3.592E-07	5.168E-08	2.665E-08	3.800E-09	1.226E-09	外側反射体-A ; 14
2	2.539E-07	3.659E-08	1.798E-08	2.853E-09	9.770E-10	外側反射体-B ; 15
1	7.163E-08	2.593E-08	3.250E-08	2.044E-09	7.401E-10	

表2.2-18 第27サイクル初期における吸収材 (B₄C) 密度係数の空間分布

no.	 1....	 2....	 3....	 4....	 5....	 6....	 7....	 8....	 9....	 10....
	[($\Delta k/k'$ / $\Delta \rho / \rho$) / cc]									
15	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-6.799E-07	0.000E+00	0.000E+00
14	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-1.230E-06	0.000E+00	0.000E+00
13	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-2.495E-06	0.000E+00	0.000E+00
12	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-5.498E-06	0.000E+00	0.000E+00
11	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
10	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
9	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
8	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
7	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
6	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
5	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
4	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
3	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

no.	 11....	 12....	 13....	 14....	 15....
15	-5.212E-07	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
14	-1.018E-06	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
13	-1.960E-06	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
12	-3.724E-06	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
11	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
10	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
9	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
8	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
7	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
6	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
5	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
4	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
3	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

軸方向領域
 軸方向反射体部 ; 1, 15
 インシュレータペレット部 ; 2, 14
 燃料部 ; 3~1

径方向領域
 炉心燃料 ; 1, 2, 4, 5, 9, 10
 特殊反射体 ; 3, 12
 特殊燃料-B ; 6
 特殊燃料-C ; 7
 制御棒 ; 8, 11
 内側反射体 ; 13
 外側反射体-A ; 14
 外側反射体-B ; 15

表2.2-19 第27サイクル初期におけるドップラー係数の空間分布

										[(-T·dk/dT)/cc]	
no.	 1....	 2....	 3....	 4....	 5....	 6....	 7....	 8....	 9....	 10....	
15	-1.066E-09	-8.763E-10	-6.844E-10	-3.488E-10	5.146E-11	2.400E-10	2.201E-10	0.000E+00	-1.164E-11	-4.152E-11	
14	-5.440E-09	-4.676E-09	-5.398E-10	-2.417E-09	-4.667E-10	3.480E-10	2.649E-10	1.662E-11	-3.920E-10	-5.864E-10	
13	-9.836E-09	-8.838E-09	-7.225E-10	-5.146E-09	-1.316E-09	2.326E-10	4.319E-10	1.662E-11	-1.120E-09	-1.746E-09	
12	-1.056E-08	-9.801E-09	-2.284E-09	-6.653E-09	-3.324E-09	-9.585E-10	-9.311E-10	-2.077E-10	-2.689E-09	-4.188E-09	
11	-1.319E-08	-1.245E-08	-4.186E-09	-9.360E-09	-6.736E-09	-3.365E-09	-4.048E-09	0.000E+00	-5.440E-09	-7.858E-09	
10	-1.615E-08	-1.537E-08	-5.988E-09	-1.210E-08	-9.593E-09	-5.133E-09	-6.201E-09	-2.849E-10	-7.693E-09	-1.053E-08	
9	-1.850E-08	-1.766E-08	-7.334E-09	-1.415E-08	-1.155E-08	-6.301E-09	-7.604E-09	-4.750E-10	-9.217E-09	-1.232E-08	
8	-1.968E-08	-1.885E-08	-7.993E-09	-1.524E-08	-1.258E-08	-6.912E-09	-8.339E-09	-5.714E-10	-1.003E-08	-1.329E-08	
7	-1.954E-08	-1.875E-08	-7.864E-09	-1.526E-08	-1.272E-08	-7.013E-09	-8.475E-09	-5.681E-10	-1.017E-08	-1.346E-08	
6	-1.818E-08	-1.750E-08	-6.977E-09	-1.437E-08	-1.217E-08	-6.727E-09	-8.167E-09	-4.751E-10	-9.767E-09	-1.294E-08	
5	-1.623E-08	-1.571E-08	-5.482E-09	-1.306E-08	-1.137E-08	-6.335E-09	-7.758E-09	-3.173E-10	-9.130E-09	-1.198E-08	
4	-1.522E-08	-1.486E-08	-3.713E-09	-1.253E-08	-1.127E-08	-6.414E-09	-7.942E-09	-1.412E-10	-8.924E-09	-1.110E-08	
3	-1.942E-08	-1.894E-08	-2.159E-09	-1.602E-08	-1.416E-08	-7.989E-09	-9.777E-09	-1.662E-11	-1.094E-08	-1.142E-08	
2	-1.164E-08	-1.116E-08	-5.232E-10	-9.443E-09	-8.517E-09	-5.312E-09	-5.652E-09	-1.287E-10	-6.491E-09	-5.757E-09	
1	-2.277E-09	-2.174E-09	-2.429E-09	-1.885E-09	-1.616E-09	-1.912E-09	-7.271E-09	-1.212E-09	-1.059E-09	-8.297E-10	
no.	 11....	 12....	 13....	 14....	 15....						
15	-2.162E-11	-7.890E-11	-5.091E-11	-1.811E-11	6.354E-12						
14	-4.155E-11	-1.495E-10	-2.135E-10	-3.630E-11	8.862E-12						
13	-9.952E-11	-3.571E-10	-4.386E-10	-6.802E-11	1.179E-11						
12	-2.493E-10	-7.666E-10	-8.031E-10	-1.127E-10	1.487E-11						
11	-8.224E-11	-1.394E-09	-1.261E-09	-1.645E-10	1.802E-11						
10	-1.794E-10	-1.909E-09	-1.666E-09	-2.135E-10	2.076E-11						
9	-2.508E-10	-2.282E-09	-1.964E-09	-2.517E-10	2.284E-11						
8	-2.891E-10	-2.486E-09	-2.131E-09	-2.749E-10	2.392E-11						
7	-2.924E-10	-2.516E-09	-2.158E-09	-2.791E-10	2.392E-11						
6	-2.649E-10	-2.385E-09	-2.057E-09	-2.666E-10	2.292E-11						
5	-2.159E-10	-2.135E-09	-1.855E-09	-2.400E-10	2.101E-11						
4	-1.628E-10	-1.836E-09	-1.595E-09	-2.045E-10	1.836E-11						
3	-1.445E-10	-1.582E-09	-1.321E-09	-1.655E-10	1.537E-11						
2	-1.429E-10	-1.427E-09	-1.057E-09	-1.288E-10	1.238E-11						
1	-7.218E-10	-1.009E-09	-5.224E-10	-9.942E-11	9.493E-12						

軸方向領域

軸方向反射体部 ; 1, 15
 インシュレータペレット部 ; 2, 14
 燃料部 ; 3~1

径方向領域

炉心燃料 ; 1, 2, 4, 5, 9, 10
 特殊反射体 ; 3, 12
 特殊燃料-B ; 6
 特殊燃料-C ; 7
 制御棒 ; 8, 11
 内側反射体 ; 13
 外側反射体-A ; 14
 外側反射体-B ; 15

表2.2-20 第27サイクル末期における燃料密度係数の空間分布

no.	1....	2....	3....	4....	5....	6....	7....	8....	9....	10....
15	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
14	1.494E-07	1.407E-07	0.000E+00	1.296E-07	1.167E-07	7.350E-08	7.000E-08	0.000E+00	6.234E-08	3.902E-08
13	3.309E-06	3.049E-06	0.000E+00	2.400E-06	1.878E-06	8.267E-07	8.574E-07	0.000E+00	1.134E-06	7.601E-07
12	4.407E-06	4.077E-06	0.000E+00	3.182E-06	2.482E-06	9.770E-07	1.004E-06	0.000E+00	1.475E-06	1.052E-06
11	5.539E-06	5.129E-06	0.000E+00	3.994E-06	3.131E-06	1.166E-06	1.200E-06	0.000E+00	1.853E-06	1.344E-06
10	6.523E-06	6.043E-06	0.000E+00	4.701E-06	3.694E-06	1.329E-06	1.368E-06	0.000E+00	2.186E-06	1.597E-06
9	7.214E-06	6.684E-06	0.000E+00	5.199E-06	4.091E-06	1.444E-06	1.487E-06	0.000E+00	2.422E-06	1.777E-06
8	7.507E-06	6.958E-06	0.000E+00	5.413E-06	4.264E-06	1.493E-06	1.538E-06	0.000E+00	2.527E-06	1.858E-06
7	7.358E-06	6.821E-06	0.000E+00	5.311E-06	4.186E-06	1.470E-06	1.513E-06	0.000E+00	2.486E-06	1.830E-06
6	6.786E-06	6.291E-06	0.000E+00	4.905E-06	3.866E-06	1.376E-06	1.416E-06	0.000E+00	2.304E-06	1.696E-06
5	5.874E-06	5.445E-06	0.000E+00	4.253E-06	3.349E-06	1.225E-06	1.258E-06	0.000E+00	2.006E-06	1.475E-06
4	4.764E-06	4.414E-06	0.000E+00	3.453E-06	2.709E-06	1.036E-06	1.061E-06	0.000E+00	1.638E-06	1.195E-06
3	3.660E-06	3.385E-06	0.000E+00	2.656E-06	2.050E-06	8.240E-07	8.374E-07	0.000E+00	1.276E-06	8.984E-07
2	1.461E-07	1.286E-07	0.000E+00	1.308E-07	8.404E-08	2.552E-08	3.083E-08	0.000E+00	8.023E-08	4.657E-08
1	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

no.	11....	12....	13....	14....	15....
15	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
14	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
13	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
12	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
11	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
10	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
9	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
8	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
7	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
6	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
5	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
4	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
3	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

軸方向領域
 軸方向反射体部 ; 1, 15
 インシュレータペレット部 ; 2, 14
 燃料部 ; 3~1

径方向領域
 炉心燃料 ; 1, 2, 4, 5, 9, 10
 特殊反射体 ; 3, 12
 特殊燃料-B ; 6
 特殊燃料-C ; 7
 制御棒 ; 8, 11
 内側反射体 ; 13
 外側反射体-A ; 14
 外側反射体-B ; 15

表2.2-21 第27サイクル末期における構造材密度係数の空間分布

[($\Delta k/kk'$ / $\Delta \rho / \rho$) / cc]										
no.	 1....	 2....	 3....	 4....	 5....	 6....	 7....	 8....	 9....	 10....
15	4.705E-07	4.544E-07	4.621E-07	4.050E-07	3.480E-07	3.274E-07	3.065E-07	5.080E-08	1.631E-07	1.200E-07
14	7.419E-07	6.910E-07	7.654E-07	6.118E-07	5.435E-07	6.483E-07	5.488E-07	1.419E-07	2.840E-07	1.841E-07
13	3.620E-07	3.357E-07	1.478E-06	2.981E-07	2.697E-07	4.599E-07	3.532E-07	2.000E-07	1.732E-07	1.180E-07
12	1.747E-07	1.827E-07	1.003E-06	1.876E-07	2.053E-07	3.485E-07	2.608E-07	3.019E-07	1.417E-07	1.462E-07
11	-1.635E-08	2.235E-08	4.891E-07	8.130E-08	1.642E-07	2.936E-07	2.223E-07	2.021E-07	1.310E-07	1.733E-07
10	-1.814E-07	-1.168E-07	4.430E-08	-9.151E-09	1.285E-07	2.433E-07	1.871E-07	1.175E-07	1.242E-07	1.960E-07
9	-2.970E-07	-2.142E-07	-2.675E-07	-7.275E-08	1.028E-07	2.070E-07	1.616E-07	5.829E-08	1.192E-07	2.114E-07
8	-3.460E-07	-2.562E-07	-4.025E-07	-1.011E-07	9.015E-08	1.891E-07	1.488E-07	3.140E-08	1.161E-07	2.174E-07
7	-3.202E-07	-2.356E-07	-3.392E-07	-9.015E-08	9.190E-08	1.916E-07	1.499E-07	3.989E-08	1.147E-07	2.129E-07
6	-2.205E-07	-1.535E-07	-7.960E-08	-4.070E-08	1.076E-07	2.134E-07	1.643E-07	8.196E-08	1.151E-07	1.980E-07
5	-5.690E-08	-1.805E-08	3.522E-07	4.160E-08	1.344E-07	2.505E-07	1.887E-07	1.504E-07	1.167E-07	1.736E-07
4	1.518E-07	1.552E-07	9.141E-07	1.476E-07	1.670E-07	2.934E-07	2.163E-07	2.298E-07	1.197E-07	1.405E-07
3	3.705E-07	3.361E-07	1.527E-06	2.612E-07	1.924E-07	3.067E-07	2.201E-07	2.832E-07	1.272E-07	9.475E-08
2	3.544E-07	3.136E-07	4.636E-07	2.944E-07	1.977E-07	2.868E-07	2.777E-07	1.700E-07	1.721E-07	1.019E-07
1	3.227E-07	3.118E-07	3.616E-07	2.707E-07	2.208E-07	2.246E-07	-3.214E-08	2.266E-07	1.872E-07	1.216E-07

no.	 11....	 12....	 13....	 14....	 15....
15	2.283E-08	9.089E-08	5.211E-08	1.571E-08	5.244E-09
14	5.190E-08	1.934E-07	1.018E-07	2.354E-08	7.496E-09
13	5.870E-08	3.264E-07	1.637E-07	3.368E-08	1.021E-08
12	1.277E-07	4.037E-07	2.200E-07	4.448E-08	1.318E-08
11	1.117E-07	4.789E-07	2.708E-07	5.469E-08	1.614E-08
10	9.786E-08	5.389E-07	3.119E-07	6.319E-08	1.873E-08
9	8.768E-08	5.785E-07	3.394E-07	6.911E-08	2.065E-08
8	8.242E-08	5.939E-07	3.506E-07	7.180E-08	2.164E-08
7	8.254E-08	5.831E-07	3.444E-07	7.100E-08	2.160E-08
6	8.720E-08	5.461E-07	3.209E-07	6.683E-08	2.055E-08
5	9.414E-08	4.845E-07	2.818E-07	5.974E-08	1.865E-08
4	9.819E-08	3.988E-07	2.302E-07	5.057E-08	1.617E-08
3	8.037E-08	2.851E-07	1.704E-07	4.041E-08	1.340E-08
2	5.074E-08	2.074E-07	1.146E-07	3.065E-08	1.065E-08
1	9.263E-08	1.389E-07	7.532E-08	2.273E-08	8.112E-09

軸方向領域					
軸方向反射体部					
インシュレータペレット部					
燃料部					
径方向領域					
炉心燃料					
特殊反射体					
特殊燃料-B					
特殊燃料-C					
制御棒					
内側反射体					
外側反射体-A					
外側反射体-B					

; 1, 15
; 2, 14
; 3~1; 1, 2, 4, 5, 9, 10
; 3, 12
; 6
; 7
; 8, 11
; 13
; 14
; 15

表2.2-22 第27サイクル末期における冷却材密度係数の空間分布

no.	1....	2....	3....	4....	5....	6....	7....	8....	9....	10....	[($\Delta k/k' / \Delta \rho / \rho$)/cc]	
15	1.106E-07	1.054E-07	9.284E-08	8.889E-08	7.108E-08	1.547E-07	1.741E-07	3.510E-08	3.273E-08	2.465E-08		
14	1.886E-07	1.743E-07	5.319E-07	1.462E-07	1.187E-07	2.174E-07	2.124E-07	1.056E-07	6.162E-08	4.062E-08		
13	2.076E-07	1.900E-07	3.930E-07	1.599E-07	1.311E-07	2.278E-07	2.229E-07	1.650E-07	8.342E-08	5.763E-08		
12	1.476E-07	1.442E-07	3.048E-07	1.304E-07	1.218E-07	1.997E-07	1.970E-07	1.038E-06	8.138E-08	7.930E-08		
11	8.705E-08	9.565E-08	2.054E-07	1.026E-07	1.203E-07	1.920E-07	1.949E-07	7.577E-07	8.722E-08	9.893E-08		
10	3.470E-08	5.335E-08	1.188E-07	7.885E-08	1.177E-07	1.816E-07	1.890E-07	5.088E-07	9.255E-08	1.150E-07		
9	-1.851E-09	2.370E-08	5.781E-08	6.190E-08	1.153E-07	1.731E-07	1.837E-07	3.316E-07	9.601E-08	1.260E-07		
8	-1.725E-08	1.100E-08	3.145E-08	5.430E-08	1.137E-07	1.686E-07	1.806E-07	2.509E-07	9.715E-08	1.306E-07		
7	-8.802E-09	1.755E-08	4.412E-08	5.730E-08	1.133E-07	1.689E-07	1.802E-07	2.777E-07	9.600E-08	1.284E-07		
6	2.370E-08	4.335E-08	9.580E-08	7.105E-08	1.144E-07	1.741E-07	1.829E-07	4.080E-07	9.260E-08	1.193E-07		
5	7.755E-08	8.640E-08	1.822E-07	9.430E-08	1.169E-07	1.834E-07	1.880E-07	6.227E-07	8.745E-08	1.045E-07		
4	1.479E-07	1.431E-07	2.958E-07	1.256E-07	1.203E-07	1.945E-07	1.939E-07	8.849E-07	8.180E-08	8.483E-08		
3	2.275E-07	2.075E-07	4.240E-07	1.640E-07	1.229E-07	1.940E-07	1.877E-07	1.109E-06	8.030E-08	6.025E-08		
2	3.747E-07	3.356E-07	9.439E-07	3.144E-07	2.168E-07	1.289E-07	1.533E-07	7.111E-07	1.780E-07	1.128E-07		
1	2.301E-07	2.221E-07	1.590E-07	1.923E-07	1.581E-07	1.017E-07	1.127E-08	1.719E-07	1.275E-07	8.300E-08		

no.	11....	12....	13....	14....	15....	
15	1.645E-08	1.181E-08	1.916E-08	1.331E-09	4.804E-10	軸方向領域
14	4.045E-08	2.755E-08	1.308E-08	2.068E-09	6.882E-10	軸方向反射体部 ; 1, 15
13	5.055E-08	4.919E-08	2.242E-08	3.036E-09	9.350E-10	インシュレータペレット部 ; 2, 14
12	4.496E-07	6.521E-08	3.179E-08	4.100E-09	1.206E-09	燃料部 ; 3~1
11	4.231E-07	7.907E-08	4.019E-08	5.116E-09	1.474E-09	
10	3.955E-07	8.993E-08	4.690E-08	5.965E-09	1.710E-09	径方向領域
9	3.736E-07	9.715E-08	5.140E-08	6.555E-09	1.885E-09	炉心燃料 ; 1, 2, 4, 5, 9, 10
8	3.619E-07	1.002E-07	5.333E-08	6.825E-09	1.975E-09	特殊反射体 ; 3, 12
7	3.618E-07	9.865E-08	5.251E-08	6.745E-09	1.971E-09	特殊燃料-B ; 6
6	3.716E-07	9.272E-08	4.899E-08	6.340E-09	1.875E-09	特殊燃料-C ; 7
5	3.860E-07	8.274E-08	4.308E-08	5.640E-09	1.700E-09	制御棒 ; 8, 11
4	3.938E-07	6.896E-08	3.524E-08	4.743E-09	1.473E-09	内側反射体 ; 13
3	3.558E-07	5.067E-08	2.614E-08	3.752E-09	1.220E-09	外側反射体-A ; 14
2	2.500E-07	3.578E-08	1.760E-08	2.809E-09	9.690E-10	外側反射体-B ; 15
1	7.012E-08	2.528E-08	3.178E-08	2.007E-09	7.319E-10	

表2.2-23 第27サイクル末期における吸収材 (B₄C) 密度係数の空間分布

[($\Delta k/k'$ / $\Delta \rho / \rho$) / cc]										
no.	 1....	 2....	 3....	 4....	 5....	 6....	 7....	 8....	 9....	 10....
15	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-8.160E-07	0.000E+00	0.000E+00
14	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-1.552E-06	0.000E+00	0.000E+00
13	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-3.884E-06	0.000E+00	0.000E+00
12	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
11	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
10	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
9	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
8	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
7	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
6	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
5	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
4	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
3	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

no.	 11....	 12....	 13....	 14....	 15....
15	-6.394E-07	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
14	-1.283E-06	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
13	-2.842E-06	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
12	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
11	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
10	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
9	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
8	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
7	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
6	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
5	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
4	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
3	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
1	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

軸方向領域
 軸方向反射体部 ; 1, 15
 インシュレータペレット部 ; 2, 14
 燃料部 ; 3~1

径方向領域
 炉心燃料 ; 1, 2, 4, 5, 9, 10
 特殊反射体 ; 3, 12
 特殊燃料-B ; 6
 特殊燃料-C ; 7
 制御棒 ; 8, 11
 内側反射体 ; 13
 外側反射体-A ; 14
 外側反射体-B ; 15

表2.2-24 第27サイクル末期におけるドップラー係数の空間分布

no.	1....	2....	3....	4....	5....	6....	7....	8....	9....	10....
15	-1.213E-09	-1.015E-09	-8.131E-10	-4.460E-10	2.408E-11	2.732E-10	2.550E-10	0.000E+00	-2.325E-11	-6.228E-11
14	-6.022E-09	-5.258E-09	-6.894E-10	-2.899E-09	-7.143E-10	3.904E-10	3.074E-10	2.493E-11	-5.465E-10	-8.007E-10
13	-1.061E-08	-9.721E-09	-1.038E-09	-6.281E-09	-2.798E-09	-6.495E-10	-6.262E-10	-9.140E-11	-2.164E-09	-3.184E-09
12	-1.124E-08	-1.062E-08	-2.666E-09	-7.940E-09	-5.662E-09	-2.764E-09	-3.371E-09	1.329E-10	-4.590E-09	-6.602E-09
11	-1.376E-08	-1.317E-08	-4.560E-09	-1.045E-08	-8.372E-09	-4.451E-09	-5.419E-09	-1.329E-10	-6.774E-09	-9.299E-09
10	-1.655E-08	-1.589E-08	-6.279E-09	-1.286E-08	-1.059E-08	-5.764E-09	-6.985E-09	-3.580E-10	-8.507E-09	-1.140E-08
9	-1.868E-08	-1.796E-08	-7.511E-09	-1.462E-08	-1.213E-08	-6.668E-09	-8.056E-09	-5.158E-10	-9.706E-09	-1.286E-08
8	-1.968E-08	-1.892E-08	-8.057E-09	-1.546E-08	-1.289E-08	-7.115E-09	-8.588E-09	-5.897E-10	-1.030E-08	-1.361E-08
7	-1.935E-08	-1.865E-08	-7.841E-09	-1.530E-08	-1.285E-08	-7.108E-09	-8.593E-09	-5.714E-10	-1.029E-08	-1.361E-08
6	-1.789E-08	-1.728E-08	-6.902E-09	-1.430E-08	-1.218E-08	-6.749E-09	-8.197E-09	-4.709E-10	-9.800E-09	-1.297E-08
5	-1.588E-08	-1.542E-08	-5.399E-09	-1.291E-08	-1.128E-08	-6.306E-09	-7.726E-09	-3.107E-10	-9.094E-09	-1.193E-08
4	-1.479E-08	-1.451E-08	-3.646E-09	-1.230E-08	-1.111E-08	-6.337E-09	-7.850E-09	-1.329E-10	-8.831E-09	-1.099E-08
3	-1.866E-08	-1.829E-08	-2.126E-09	-1.560E-08	-1.385E-08	-7.835E-09	-9.594E-09	-1.662E-11	-1.075E-08	-1.124E-08
2	-1.128E-08	-1.085E-08	-5.149E-10	-9.219E-09	-8.337E-09	-5.205E-09	-5.541E-09	-1.254E-10	-6.375E-09	-5.663E-09
1	-2.218E-09	-2.120E-09	-2.371E-09	-1.843E-09	-1.583E-09	-1.874E-09	-7.126E-09	-1.189E-09	-1.041E-09	-8.156E-10

no.	11....	12....	13....	14....	15....
15	-2.823E-11	-1.096E-10	-7.143E-11	-2.517E-11	6.910E-12
14	-5.817E-11	-2.201E-10	-2.940E-10	-4.867E-11	9.527E-12
13	-1.828E-10	-5.698E-10	-6.113E-10	-8.729E-11	1.254E-11
12	-3.239E-11	-1.135E-09	-1.042E-09	-1.366E-10	1.570E-11
11	-1.279E-10	-1.657E-09	-1.462E-09	-1.881E-10	1.877E-11
10	-2.101E-10	-2.096E-09	-1.816E-09	-2.342E-10	2.143E-11
9	-2.691E-10	-2.410E-09	-2.069E-09	-2.666E-10	2.351E-11
8	-2.990E-10	-2.570E-09	-2.198E-09	-2.841E-10	2.442E-11
7	-2.973E-10	-2.563E-09	-2.196E-09	-2.841E-10	2.433E-11
6	-2.658E-10	-2.405E-09	-2.072E-09	-2.691E-10	2.309E-11
5	-2.143E-10	-2.138E-09	-1.855E-09	-2.400E-10	2.110E-11
4	-1.603E-10	-1.827E-09	-1.586E-09	-2.036E-10	1.836E-11
3	-1.420E-10	-1.566E-09	-1.309E-09	-1.640E-10	1.528E-11
2	-1.404E-10	-1.407E-09	-1.043E-09	-1.272E-10	1.229E-11
1	-7.085E-10	-9.933E-10	-5.141E-10	-9.792E-11	9.402E-12

軸方向領域	
軸方向反射体部	; 1, 15
インシュレータペレット部	; 2, 14
燃料部	; 3~1
径方向領域	
炉心燃料	; 1, 2, 4, 5, 9, 10
特殊反射体	; 3, 12
特殊燃料-B	; 6
特殊燃料-C	; 7
制御棒	; 8, 11
内側反射体	; 13
外側反射体-A	; 14
外側反射体-B	; 15

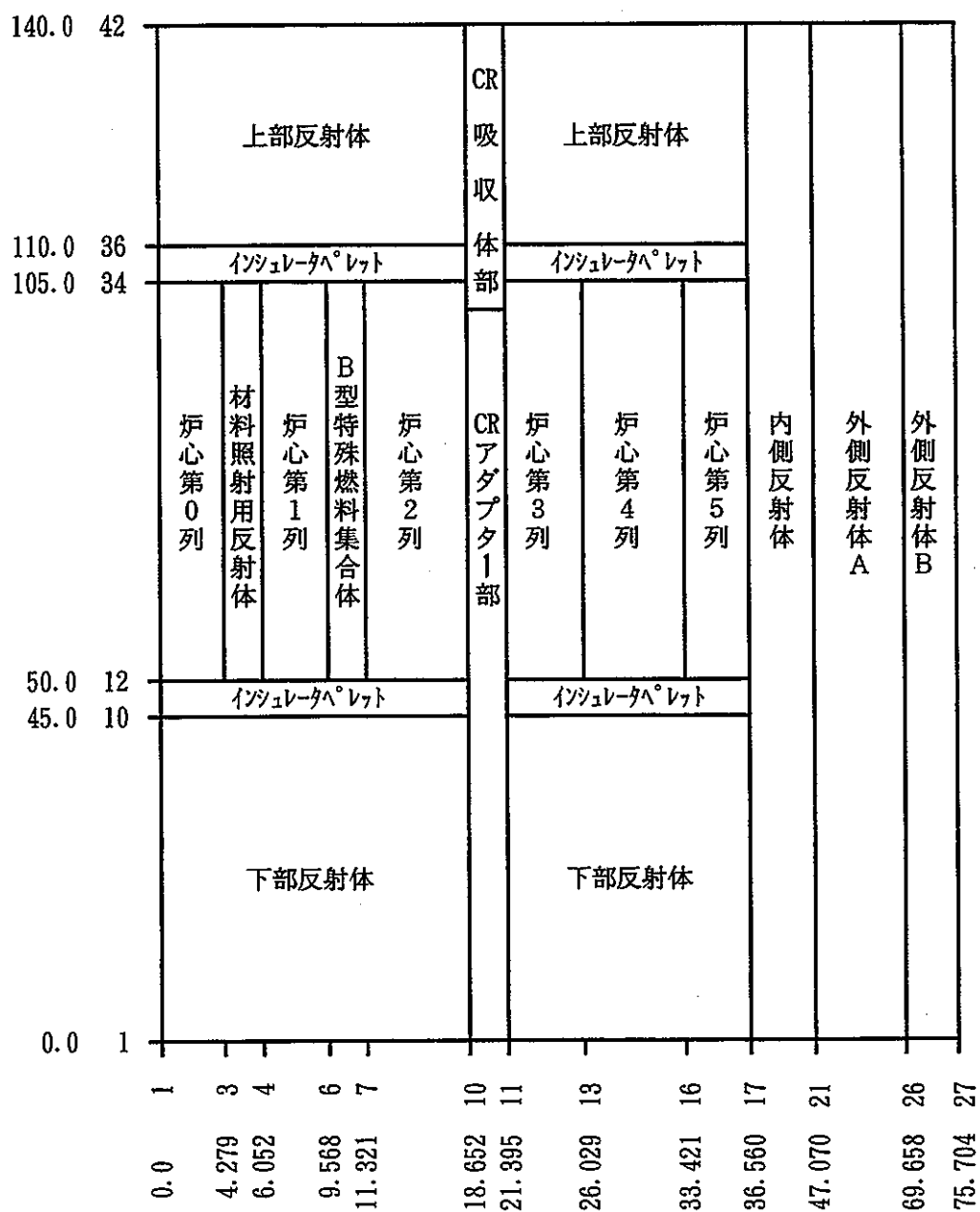


図2.2-1 第0サイクル炉心（出力上昇試験炉心）の二次元RZモデル

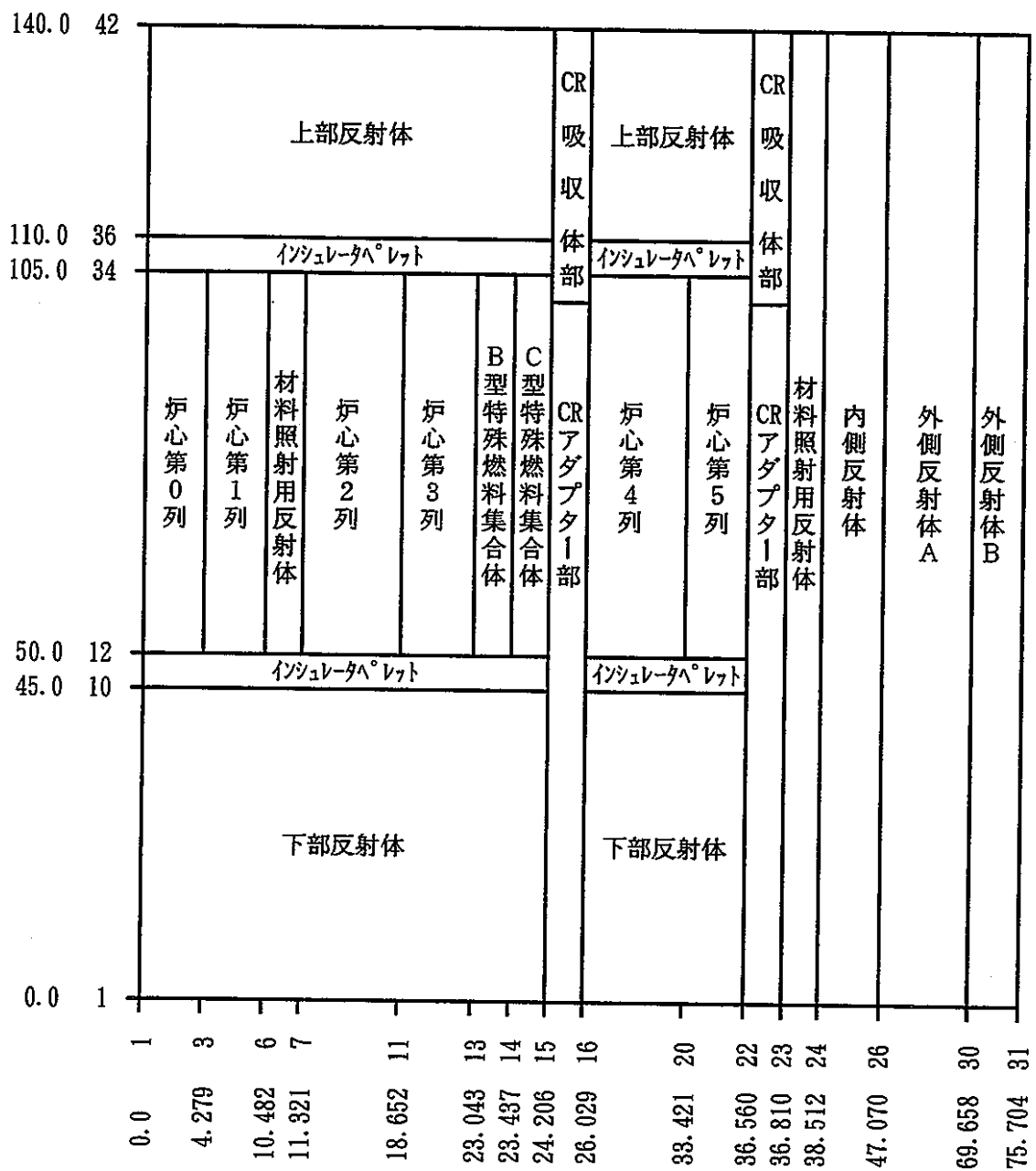


図2.2-2 第27サイクル炉心の二次元RZモデル

2.3 等温係数評価

2.3.1 解析方法

等温反応度係数は、原子炉を構成する材料が一様に温度上昇した場合に膨脹およびドップラー効果によって反応度を失う量の1℃当たりの平均値である。

等温反応度係数算出に必要な核特性値は、ドップラー係数、燃料、構造材および冷却材の密度係数、軸方向および径方向の形状係数である。その他重要な物性値としては、燃料および構造材の線膨脹率、冷却材の密度変化量である。

炉心構成要素の温度変化による反応度変化の項目は次のとおりである。

- a) 燃料ペレットの膨脹
- b) 被覆管の膨脹
- c) ラッパ管の膨脹
- d) 冷却材の密度変化
- e) 炉心支持板の膨脹
- f) ドップラー効果

温度変化による反応度変化の計算方法を項目毎に示す。

1) 燃料ペレットの膨脹

仮定として、燃料ペレットが熱膨脹しても被覆管との相互干渉はないものとする。従って、半径方向への熱膨脹による体積増加は、それによる密度減少と相殺し、均質化組成としては不変であるので反応度変化はないものと考えてよい。

軸方向への熱膨脹については、炉心高さが増加し、燃料ペレットの密度は減少する。

この効果は次式で表される。

$$\begin{aligned}\frac{\Delta k/k}{\Delta T} &= -\alpha_F(T) \cdot \left(\frac{\Delta k/k}{\Delta \rho_F/\rho_F} - \frac{\Delta k/k}{\Delta H/H} \right) \\ &= -\alpha_F(T) \cdot (K_F - K_H)\end{aligned}$$

$\alpha_F(T)$: 燃料ペレットの線膨脹率(/°C)

K_F : 燃料密度係数($\Delta k/k / \Delta \rho_F/\rho_F$)

K_H : 炉心高さ係数($\Delta k/k / \Delta H/H$)

2) 被覆管の膨脹

燃料ペレットの膨脹の場合と同じ仮定をする。すなわち、被覆管が膨脹しても燃料ペレットの寸法、密度等は変化しないものとする。

軸方向への膨脹については、被覆管全長が伸び、密度が減少する。被覆管全長が軸方向に伸びても炉心部の体積変化はない。従って、軸方向膨脹による密度変化のみの反応度変化を考慮する。

一方、半径方向への膨脹については、体積の増加は密度減少と相殺し、均質化組成としては不変であるので反応度変化はないが、体積増加により冷却材が炉外に押し出されるために反応度変化が生じる。

これらの効果は次式で表される。

$$\begin{aligned}\frac{\Delta k/k}{\Delta T} &= -\alpha_s(T) \frac{V_c}{V_s} \cdot \frac{\Delta k/k}{\Delta \rho_s/\rho_s} - 2\alpha_s(T) \\ &\quad \cdot \frac{V_p}{V_N} \cdot \frac{\Delta k/k}{\Delta \rho_N/\rho_N} \\ &= -\alpha_s(T) \left\{ \frac{V_c}{V_s} \cdot K_s + 2 \cdot \frac{V_p}{V_N} \cdot K_N \right\}\end{aligned}$$

$\alpha_s(T)$: 構造材 (S U S) の線膨脹率(/°C)

- K_s : 構造材密度係数 ($\Delta k/k / \Delta \rho_s / \rho_s$)
 K_N : 冷却材密度係数 ($\Delta k/k / \Delta \rho_N / \rho_N$)
 V_c : 被覆管の体積比 (ラッピング・ワイヤも含む)
 V_P : 燃料要素の体積比
 (被覆管内およびラッピング・ワイヤも含む)
 V_s : 構造材 (ラッパ管、被覆管およびラッピング・ワイヤ) の体積比
 V_N : 冷却材の体積比

3) ラッパ管の膨脹

被覆管の膨脹の場合と同様である。

軸方向への膨脹については、密度減少による反応度変化を考慮し、径方向への膨脹については冷却材の排除による反応度変化を考慮する。

これらの効果は次式で表される。

$$\begin{aligned}
 \frac{\Delta k/k}{\Delta T} &= -\alpha_s(T) \frac{V_w}{V_s} \cdot \frac{\Delta k/k}{\Delta \rho_s / \rho_s} - 2\alpha_s(T) \\
 &\quad \cdot \frac{V_w}{V_N} \cdot \frac{\Delta k/k}{\Delta \rho_N / \rho_N} \\
 &= -\alpha_s(T) \cdot \left\{ \frac{V_w}{V_s} \cdot K_s + 2 \cdot \frac{V_w}{V_N} \cdot K_N \right\}
 \end{aligned}$$

V_w : ラッパ管の体積比

4) 冷却材の密度変化

冷却材は膨脹することにより、炉心から軸方向に押出され、炉心などに残っている冷却材は密度が減少する。従って、冷却材の密度変化によ

る反応度変化を考慮すればよい。

この効果は次式で表される。

$$\begin{aligned}\frac{\Delta k/k}{\Delta T} &= \alpha_N(T) \cdot \frac{\Delta k/k}{\Delta \rho_N / \rho_N} \\ &= \alpha_N(T) \cdot K_N\end{aligned}$$

$\alpha_N(T)$: 冷却材の密度の変化率(/°C)

5) 炉心支持板の膨脹

燃料集合体および径方向反射体を支持する支持板の半径方向への膨脹により、集合体の間隙が大きくなり、その部分に冷却材が流入する。従って燃料ペレット、構造材（被覆管等）および冷却材の体積比が変化する。また、炉心半径厚さが増大する。

これらの効果は次式で表される。

$$\begin{aligned}\frac{\Delta k/k}{\Delta T} &= \left\{ \alpha_s(T) \cdot \frac{\Delta k/k}{\Delta R/R} - 2\alpha_s(T) \cdot \frac{\Delta k/k}{\Delta \rho_F / \rho_F} \right. \\ &\quad \left. - 2\alpha_s(T) \cdot \frac{\Delta k/k}{\Delta \rho_s / \rho_s} + 2\alpha_s(T) \cdot \left(\frac{1 - V_N}{V_N} \right) \right. \\ &\quad \left. \cdot \frac{\Delta k/k}{\Delta \rho_N / \rho_N} \right\} \\ &= \alpha_s(T) \cdot \left\{ K_R - 2 \cdot (K_F + K_s) + 2 \cdot \left(\frac{1 - V_N}{V_N} \right) \cdot K_N \right\}\end{aligned}$$

K_R : 炉心半径係数($\Delta k/k / \Delta R/R$)

6) ドップラー効果

ドップラー反応度は、 $T \cdot dk/kT = -A$ を一定と見放し、 $T = 1000^{\circ}\text{K} \rightarrow 300^{\circ}\text{K}$ の温度に対して求めた。ドップラー反応度による温度係数は次式により表される。

$$\frac{\Delta k/k}{\Delta T} = -A \cdot \frac{\ln(T_1/T_0)}{T_1 - T_0}$$

なお、反応度係数については 2.2章の計算結果を使用し、燃料、構造材等の線膨張率については「もんじゅ」の設計で用いた評価式を使用した。

また、本検討では、燃料の膨張に伴う制御棒との相対変位については簡易手法により評価した。燃料と制御棒の相対変位評価の詳細については 2.6章に示す。

2.3.2 解析結果

第0サイクル初期および末期の等温係数の解析結果を表2.3-1 および表2.3-2 に示す。表中の0X～5XおよびSFは、炉心第0列～炉心第5列および特殊燃料集合体を示す。以下炉心第n列をnXと記す。等温係数は、初期および末期ともに約 $-4.9 \times 10^{-3} \% \Delta k / kk' / ^\circ\text{C}$ である。これに、表2.3-3 および表2.3-4 に示す炉心温度の変化に対する燃料軸方向膨張と制御棒の相対変位を考慮した第0サイクル初期および末期の等温係数を表2.3-5 および表2.3-6 に示す。

第0サイクルの等温係数の測定値と解析値をまとめると下記のとおりである。

測定値	$-4.1 \times 10^{-3} \% \Delta k / kk' / ^\circ\text{C}$
解析値	$-5.0 \times 10^{-3} \% \Delta k / kk' / ^\circ\text{C}$

解析値は、測定値に比べて絶対値で約20% 過大評価している。これは、反応度係数を過大評価しているためと推定される。

第27サイクル初期および末期の等温係数の解析結果を表2.3-7 および表2.3-8 に示す。等温係数は、初期および末期ともに約 $-4.6 \times 10^{-3} \% \Delta k / kk' / ^\circ\text{C}$ である。これに、表2.3-9 および表2.3-10に示す炉心温度の変化に対する燃料軸方向膨張と制御棒の相対変位を考慮した第27サイクル初期および末期の等温係数を表2.3-11および表2.3-12に示す。

第27サイクルの等温係数の測定値と解析値をまとめると下記のとおりである。

測定値	$-4.0 \times 10^{-3} \% \Delta k / kk' / ^\circ\text{C}$
解析値	$-4.7 \times 10^{-3} \% \Delta k / kk' / ^\circ\text{C}$

第27サイクルの解析値も第0サイクルと同様の理由により、測定値に比べて絶対値で約20% 過大評価している。

第0サイクル（未燃焼炉心）と第27サイクル（平衡サイクル炉心）の等温係数を比較すると、平衡サイクルの方が測定値、解析値ともに若干小さくなる傾向にある。これは、燃料の燃焼による燃料物質インベントリーの減少およびFPが蓄積され中性子スペクトルが硬化したことによるドップラー係数の絶対値の減少、特殊反射体が炉心に多数装荷されていることによる中性子束分布の複雑な変化による構造材密度係数の減少が主要因と推定される。

表2.3-1 第0サイクル初期の等温係数

		[$\times 10^{-3} \text{ } \%(\Delta k / k k') / ^\circ \text{C}$]								
		0X	1X	2X	3X	4X	5X	SF	Other	Total
250 °C	fuel	-0.0086	-0.0250	-0.0869	-0.0655	-0.0963	-0.0334	-0.0073	0.0064	-0.3167
	structure	-0.0008	-0.0026	-0.0208	-0.0198	-0.0666	-0.0427	-0.0031	-0.6600	-0.8163
	1) pin	-0.0007	-0.0025	-0.0174	-0.0163	-0.0527	-0.0333	-0.0011	-0.5602	-0.6841
170 °C	2) wrapper	0.0000	-0.0002	-0.0034	-0.0035	-0.0139	-0.0094	-0.0020	-0.0998	-0.1322
	coolant	-0.0052	-0.0162	-0.0881	-0.0789	-0.2243	-0.1350	-0.0267	-1.0590	-1.6333
	core support	-0.0340	-0.0985	-0.3490	-0.2645	-0.4046	-0.1481	-0.0301	-0.0608	-1.3895
	b4c	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0027	-0.0027
	doppler	-0.0124	-0.0352	-0.1184	-0.0929	-0.1707	-0.1168	-0.0147	-0.1690	-0.7300
	sub-total	-0.0611	-0.1775	-0.6631	-0.5215	-0.9625	-0.4760	-0.0818	-1.9450	-4.8885

表2.3-2 第0サイクル末期の等温係数

		[$\times 10^{-3} \text{ } \%$ ($\Delta k/kk'$) / $^{\circ}\text{C}$]								
		0X	1X	2X	3X	4X	5X	SF	Other	Total
250 $^{\circ}\text{C}$	fuel	-0.0091	-0.0264	-0.0922	-0.0699	-0.1037	-0.0364	-0.0079	0.0059	-0.3396
	structure	-0.0005	-0.0020	-0.0175	-0.0177	-0.0646	-0.0419	-0.0025	-0.6580	-0.8047
	1) pin	-0.0006	-0.0020	-0.0149	-0.0147	-0.0511	-0.0327	-0.0009	-0.5579	-0.6747
170 $^{\circ}\text{C}$	2) wrapper	0.0000	0.0000	-0.0026	-0.0030	-0.0135	-0.0093	-0.0016	-0.1001	-0.1299
	coolant	-0.0046	-0.0144	-0.0795	-0.0735	-0.2176	-0.1319	-0.0241	-1.0485	-1.5940
	core support	-0.0342	-0.0991	-0.3511	-0.2674	-0.4121	-0.1515	-0.0303	-0.0704	-1.4160
	b4c	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0019	0.0019
	doppler	-0.0125	-0.0356	-0.1231	-0.0967	-0.1707	-0.1146	-0.0150	-0.1710	-0.7392
	sub-total	-0.0610	-0.1774	-0.6633	-0.5251	-0.9687	-0.4764	-0.0798	-1.9400	-4.8917

表2.3-3 第0サイクル初期の燃料軸方向膨張量

		0X	1X	2X	3X	4X	5X	SF	Average
250 °C	delta exp %	0.0788	0.0788	0.0788	0.0788	0.0788	0.0788	0.0788	0.0788
↑	exp t1 %	0.2267	0.2266	0.2266	0.2267	0.2265	0.2266	0.2266	0.2266
170 °C	exp t0 %	0.1478	0.1478	0.1478	0.1478	0.1477	0.1478	0.1478	0.1478
	core-h t1 cm	55.1247	55.1246	55.1247	55.1247	55.1246	55.1246	55.1246	55.1246
	core-h t0 cm	55.0813	55.0813	55.0813	55.0813	55.0813	55.0813	55.0813	55.0813
	delta-h cm	0.0434	0.0434	0.0434	0.0434	0.0433	0.0433	0.0433	0.0433

表2.3-4 第0サイクル末期の燃料軸方向膨張量

		0X	1X	2X	3X	4X	5X	SF	Average
250 °C	delta exp %	0.0788	0.0788	0.0788	0.0788	0.0788	0.0788	0.0788	0.0788
↑	exp t1 %	0.2267	0.2266	0.2266	0.2267	0.2265	0.2266	0.2266	0.2266
170 °C	exp t0 %	0.1478	0.1478	0.1478	0.1478	0.1477	0.1478	0.1478	0.1478
	core-h t1 cm	55.1247	55.1246	55.1247	55.1247	55.1246	55.1246	55.1246	55.1246
	core-h t0 cm	55.0813	55.0813	55.0813	55.0813	55.0813	55.0813	55.0813	55.0813
	delta-h cm	0.0434	0.0434	0.0434	0.0434	0.0433	0.0433	0.0433	0.0433

表2.3-5 第0サイクル初期の等温係数（相対変位考慮）

	($\times 10^{-3}$ % $\Delta k/kk'$ / $^{\circ}\text{C}$)			
	炉心燃料	特殊燃料	その他*1)	全炉心合計
燃料膨張	-0.316	-0.007	0.006	-0.317
構造材膨張	-0.153	-0.003	-0.660	-0.816
冷却材膨張	-0.548	-0.027	-1.059	-1.634
炉心支持板膨張	-1.299	-0.030	-0.061	-1.390
ドップラー効果	-0.546	-0.015	-0.169	-0.730
合 計	-2.862	-0.082	-1.943	-4.887
燃料と制御棒の相対変位効果（-0.115）を考慮すると				<u>-5.002</u>

表2.3-6 第0サイクル末期の等温係数（相対変位考慮）

	($\times 10^{-3}$ % $\Delta k/kk'$ / $^{\circ}\text{C}$)			
	炉心燃料	特殊燃料	その他*1)	全炉心合計
燃料膨張	-0.338	-0.008	0.006	-0.340
構造材膨張	-0.144	-0.003	-0.658	-0.805
冷却材膨張	-0.521	-0.024	-1.049	-1.594
炉心支持板膨張	-1.315	-0.030	-0.070	-1.415
ドップラー効果	-0.553	-0.015	-0.171	-0.739
合 計	-2.871	-0.080	-1.942	-4.893
燃料と制御棒の相対変位効果（-0.115）を考慮すると				<u>-5.008</u>

*1) インシュレータペレット、特殊反射体、軸方向反射体、径方向反射体

表2.3-7 第27サイクル初期の等温係数

		[$\times 10^{-3} \%$ ($\Delta k/kk'$) / $^{\circ}\text{C}$]								
		0X	1X	2X	3X	4X	5X	SF	Other	Total
250 $^{\circ}\text{C}$	fuel	-0.0120	-0.0327	-0.0994	-0.0750	-0.0865	-0.0293	-0.0037	0.0052	-0.3335
	structure	-0.0017	-0.0063	-0.0312	-0.0419	-0.0613	-0.0365	-0.0065	-0.5104	-0.6959
170 $^{\circ}\text{C}$	1) pin	-0.0015	-0.0054	-0.0255	-0.0331	-0.0481	-0.0283	-0.0018	-0.4165	-0.5602
	2) wrapper	-0.0002	-0.0010	-0.0057	-0.0088	-0.0132	-0.0081	-0.0047	-0.0940	-0.1357
	coolant	-0.0087	-0.0283	-0.1202	-0.1406	-0.2002	-0.1132	-0.0374	-0.9551	-1.6037
	core support	-0.0458	-0.1257	-0.3871	-0.3008	-0.3513	-0.1248	-0.0193	-0.0420	-1.3968
	b4c	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0004	0.0004
	doppler	-0.0101	-0.0289	-0.0919	-0.0733	-0.1168	-0.0761	-0.0102	-0.1326	-0.5400
	sub-total	-0.0783	-0.2220	-0.7299	-0.6315	-0.8161	-0.3799	-0.0772	-1.6345	-4.5695

表2.3-8 第27サイクル末期の等温係数

		[$\times 10^{-8} \text{ } \%$ ($\Delta k/kk'$) / $^{\circ}\text{C}$]								
		0X	1X	2X	3X	4X	5X	SF	Other	Total
250 $^{\circ}\text{C}$	fuel	-0.0115	-0.0317	-0.0975	-0.0740	-0.0864	-0.0294	-0.0037	0.0056	-0.3287
	structure	-0.0015	-0.0057	-0.0289	-0.0398	-0.0615	-0.0368	-0.0061	-0.5271	-0.7074
	1) pin	-0.0013	-0.0049	-0.0238	-0.0315	-0.0484	-0.0286	-0.0017	-0.4297	-0.5699
170 $^{\circ}\text{C}$	2) wrapper	-0.0002	-0.0008	-0.0052	-0.0082	-0.0131	-0.0082	-0.0044	-0.0973	-0.1375
	coolant	-0.0080	-0.0263	-0.1140	-0.1355	-0.2022	-0.1145	-0.0360	-1.0022	-1.6386
	core support	-0.0439	-0.1219	-0.3784	-0.2956	-0.3503	-0.1249	-0.0188	-0.0584	-1.3923
	b4c	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0014	-0.0014
	doppler	-0.0101	-0.0293	-0.0949	-0.0782	-0.1249	-0.0809	-0.0105	-0.1367	-0.5654
	sub-total	-0.0751	-0.2149	-0.7137	-0.6231	-0.8253	-0.3865	-0.0752	-1.7201	-4.6338

表2.3-9 第27サイクル初期の燃料軸方向膨張量

		0X	1X	2X	3X	4X	5X	SF	Average
250 °C	delta exp %	0.0789	0.0789	0.0789	0.0789	0.0789	0.0789	0.0789	0.0789
↑	exp pl %	0.2268	0.2268	0.2268	0.2268	0.2268	0.2268	0.2268	0.2268
170 °C	exp p0 %	0.1479	0.1479	0.1479	0.1479	0.1479	0.1479	0.1479	0.1479
	core-h pl cm	55.1247	55.1247	55.1247	55.1247	55.1247	55.1247	55.1247	55.1247
	core-h p0 cm	55.0814	55.0814	55.0814	55.0814	55.0814	55.0814	55.0814	55.0814
	delta-h cm	0.0434	0.0434	0.0434	0.0434	0.0434	0.0434	0.0434	0.0434

表2.3-10 第27サイクル末期の燃料軸方向膨張量

		0X	1X	2X	3X	4X	5X	SF	Average
250 °C	delta exp %	0.0789	0.0789	0.0789	0.0789	0.0789	0.0789	0.0789	0.0789
↑	exp pl %	0.2268	0.2268	0.2268	0.2268	0.2268	0.2268	0.2268	0.2268
170 °C	exp p0 %	0.1479	0.1479	0.1479	0.1479	0.1479	0.1479	0.1479	0.1479
	core-h pl cm	55.1247	55.1247	55.1247	55.1247	55.1247	55.1247	55.1247	55.1247
	core-h p0 cm	55.0814	55.0814	55.0814	55.0814	55.0814	55.0814	55.0814	55.0814
	delta-h cm	0.0434	0.0434	0.0434	0.0434	0.0434	0.0434	0.0434	0.0434

表2.3-11 第27サイクル初期の等温係数（相対変位考慮）

	($\times 10^{-3}$ % $\Delta k/kk'$ / $^{\circ}\text{C}$)			
	炉心燃料	特殊燃料	その他 ^{*1)}	全炉心合計
燃料膨張	-0.335	-0.004	0.005	-0.334
構造材膨張	-0.179	-0.007	-0.510	-0.696
冷却材膨張	-0.611	-0.037	-0.955	-1.603
炉心支持板膨張	-1.336	-0.019	-0.042	-1.397
ドップラー効果	-0.397	-0.010	-0.133	-0.540
合 計	-2.858	-0.077	-1.635	-4.570
燃料と制御棒の相対変位効果（-0.079）を考慮すると				<u>-4.649</u>

表2.3-12 第27サイクル末期の等温係数（相対変位考慮）

	($\times 10^{-3}$ % $\Delta k/kk'$ / $^{\circ}\text{C}$)			
	炉心燃料	特殊燃料	その他 ^{*1)}	全炉心合計
燃料膨張	-0.331	-0.004	0.006	-0.329
構造材膨張	-0.174	-0.006	-0.527	-0.707
冷却材膨張	-0.600	-0.036	-1.002	-1.638
炉心支持板膨張	-1.315	-0.019	-0.058	-1.392
ドップラー効果	-0.418	-0.011	-0.137	-0.566
合 計	-2.838	-0.076	-1.718	-4.632
燃料と制御棒の相対変位効果（-0.079）を考慮すると				<u>-4.711</u>

*1) インシュレータペレット、特殊反射体、軸方向反射体、径方向反射体

2.4 出力係数測定結果の概要

2.4.1 第0サイクル（出力上昇試験時）の測定結果

「常陽」MK-IIでは、第0サイクルの出力上昇試験時に多数の出力係数が測定されている。各出力レベルにおける余剰反応度の測定は合計で190点の測定データ数である。

第0サイクル出力上昇試験時の運転実績および出力係数測定点を図2.4-1に示す。この第0サイクル出力上昇試験時の出力係数測定を大別すると次のようにまとめられる。

- a) 第0－1サイクル ～25MWまでの出力上昇
出力上昇時の出力係数測定
- b) 第0－2サイクル ～25MWまでの出力上昇
出力上昇時の出力係数測定
- c) 第0－3サイクル ～50MWまでの出力上昇
出力上昇時の出力係数測定
- d) 第0－4サイクル ～50MWまでの出力上昇
出力上昇時及び出力下降時の出力係数測定
- e) 第0－5サイクル ～50MWまでの出力上昇
出力上昇時の出力係数測定
- f) 第0－6サイクル ～50, 75, 85MWまでの出力上昇
出力上昇時及び出力下降時の出力係数測定
- g) 第0－7サイクル ～90, 95, 100MWまでの出力上昇
出力上昇時、出力下降時及び出力上昇時の出力係数測定
- h) 第0－8サイクル ～50, 75, 100MWまでの出力上昇
出力上昇時の出力係数測定
- i) 第0－9サイクル ～50, 100MWまでの出力上昇
出力上昇時及び出力下降時の出力係数測定

第0サイクル出力上昇試験時の出力係数測定結果を表2.4-1～表2.4-9及び図2.4-2～図2.4-15に示す。これらの測定結果の特徴をまとめると次のとおりである。

- a) 燃焼が進むに従って出力係数の絶対値は小さくなる。
- b) 第0～1サイクルから第0～6サイクルまでの出力係数は、出力の上昇に伴い絶対値が増大する傾向にある。
- c) 第0～7サイクル以降では、
 - ・約0MW～約40MW 出力係数の絶対値は減少する傾向にある。
 - ・約40MW～約80MW 出力係数の絶対値は増大する傾向にある。
 - ・約80MW～約100MW 出力係数の絶対値は減少する傾向にある。
- d) 100MW出力を経験した第0～7サイクル以降では、サイクル間の出力係数の差は小さい。また、出力レベル依存性が小さくなる傾向にある。
- e) 出力係数測定時にある出力において長時間の出力保持を行った場合、
 - ・約80MW以下 出力係数の絶対値は増大する傾向にある。
 - ・約80MW以上 出力係数の絶対値は減少する傾向にある。
- f) 第0～7サイクルおよび第0～9サイクルにおいては、100%までの出力上昇時の出力係数測定を行った後、短期間（1～4日程度）100%出力保持を行い出力下降時の出力係数測定を行っている。言い換えれば、両サイクルとも出力上昇後、燃料がほとんど燃焼しないうちに出力下降を行った場合の出力係数測定結果である。この場合、出力上昇時と出力下降時の出力係数はほとんど同じ測定結果である。

これら出力係数の変化の原因としては、燃料の組織変化、燃料の軸方向膨張と制御棒の相対変化、原子炉容器と制御棒の相対変化等が影響していると推定される。また、反応度変化は、制御棒位置の読みで求められている。

るので、プラント温度、制御棒駆動軸等の温度の安定度による見かけの違いがどの程度かという問題に帰着すると推定される。

一方、サイクル末期では、Np-239の β 崩壊（半減期 2.4日）によりPu-239が生成され正の反応度が投入されるが、測定はほぼ1日で終了するために、この影響はほとんどないと推定される。

これらが、出力係数の変化に与える影響は次のように考えられる。

1) 燃料の組織変化

燃料の組織変化は、等軸晶領域、柱状晶領域、センターボイド領域の生成過程を経るが、センターボイド領域が生成され、その領域が拡大していくと、燃料中心温度の変化は緩慢になる。すなわち、出力変化に対する温度変化（ ΔT ）が小さくなる。従って、出力係数の絶対値は小さくなる。

一方、燃料の熱伝導率は、燃料温度の上昇に伴い低下していく。すなわち、燃料の組織変化が起こるまでは、出力変化に対する温度変化は大きくなる。従って、出力係数の絶対値は大きくなる。

2) 燃料の軸方向膨張と制御棒の相対変化

燃料が軸方向に膨張（下部は固定されているために上方に膨張）すると、出力上昇時には制御棒は相対的に挿入され、負の反応度が投入された状態となる。一方、出力下降時には制御棒は相対的に引き抜かれ、正の反応度が投入された状態となる。従って、燃料の軸方向膨張と制御棒の相対変化は、出力上昇時には出力係数の絶対値を大きくし、出力下降時には出力係数の絶対値を小さくする方向である。

3) 原子炉容器と制御棒の相対変化

原子炉容器は下部で支持されているので上方へ膨張する。一方、制御棒は上部で支持されているので下方へ膨張する。従って、原子炉容器と制御棒の相対変化に対する正負の反応度は、両者の温度変化と長さにより決まる。この場合も、燃料の軸方向膨張と制御棒の

相対変化と同様に、出力上昇時と出力下降時では反応度変化の正負は逆になる。

2.4.2 第27サイクルの測定結果

第27サイクルの初期および末期の出力係数測定結果を図2.4-16に示す。このサイクルは運転日数が約30日であり、サイクル初期および末期の炉心平均燃焼度は約33000MWd/tおよび約37000MWd/tである。従って、1サイクルの平均燃焼度は約4000MWd/tである。

この測定結果の特徴をまとめると次のとおりである。

- a) サイクル初期の出力上昇時における出力係数は、出力レベルの増大とともに出力係数の絶対値は小さくなる傾向にある。
- b) サイクル末期の出力下降時における出力係数は、出力レベルの増大とともに出力係数の絶対値は大きくなる傾向にある。
- c) 従って、サイクル初期と末期の出力係数は、出力レベルの増大により逆の傾向を示す。
- d) ただし、約75%～100%間の出力レベルにおいては、サイクル初期および末期ともに、ほぼ同じ出力係数の値である。
- e) 未燃焼の第0サイクルの出力係数との比較、第27サイクル初期と末期の比較から、炉心の平均燃焼度が増大することにより、出力係数の絶対値は減少する傾向にある。

これら出力係数の変化の原因としては、第0サイクルと同様に、燃料の組織変化、燃料の軸方向膨張と制御棒の相対変化、原子炉容器と制御棒の相対変化等が影響していると推定される。

ただし、第27サイクルでは新燃料集合体は4体だけであり、他の燃料は最低1回は100%出力を経験している。従って、第27サイクルの出力係数に燃料組織変化が影響している割合は小さいと推定される。

表2.4-1 第0-1サイクルの出力係数測定結果

測定データ 番号	原子炉熱出力 (MW)	余剰反応度 (%Δk/k)
1	2.12	2.70294
2	10.88	2.63070
3	14.93	2.58730
4	19.21	2.53936
5	23.31	2.48906

表2.4-2 第0-2サイクルの出力係数測定結果

測定データ 番号	原子炉熱出力 (MW)	余剰反応度 (%Δk/k)
6	3.21	2.60185
7	11.79	2.55560
8	16.40	2.52478
9	20.60	2.48687
10	25.03	2.44350

表2.4-3 第0-3サイクルの出力係数測定結果

測定データ 番号	原子炉熱出力 (MW)	余剰反応度 (%Δk/k)
11	6.09	2.54871
12	11.45	2.56774
13	15.57	2.53486
14	20.74	2.48587
15	25.27	2.44391
16	29.28	2.40597
17	33.76	2.36431
18	37.90	2.32226
19	44.93	2.25756
20	49.73	2.21776

表2.4-4 第0 - 4サイクルの出力係数測定結果

測定データ 番号	原子炉熱出力 (MW)	余剰反応度 (% $\Delta k/k$)
21	2.40	2.62753
22	21.39	2.48334
23	29.88	2.41009
24	39.28	2.31279
25	49.55	2.22825
26	49.05	2.25616
27	43.85	2.30305
28	40.02	2.33839
29	44.24	2.29809
30	49.26	2.24978

表2.4-5 第0 - 5サイクルの出力係数測定結果

測定データ 番号	原子炉熱出力 (MW)	余剰反応度 (% $\Delta k/k$)
31	5.40	2.63917
32	10.80	2.59896
33	15.33	2.56692
34	19.75	2.53177
35	24.99	2.48407
36	30.32	2.43893
37	35.25	2.39844
38	40.38	2.35611
39	44.83	2.31768
40	50.08	2.27254

表 2.4-6 第 0 - 6 サイクルの出力係数測定結果

測定データ 番号	原子炉熱出力 (MW)	余剰反応度 (%Δk/k)
41	2.46	2.66961
42	11.28	2.56373
43	16.53	2.56660
44	20.04	2.54289
45	25.70	2.49926
46	29.99	2.46744
47	35.43	2.42313
48	39.94	2.38821
49	44.39	2.35001
50	50.50	2.29805
51	49.01	2.32465
52	54.93	2.26957
53	59.96	2.22011
54	64.57	2.18249
55	68.95	2.13883
56	74.54	2.09772
57	77.07	2.11405
58	68.68	2.19146
59	69.22	2.19739
60	74.00	2.15347
61	73.26	2.21784
62	76.97	2.18367
63	81.19	2.14246
64	80.40	2.14988
65	84.92	2.11135

表2.4-7 第0-7サイクルの出力係数測定結果(1/2)

測定データ 番号	原子炉熱出力 (MW)	余剰反応度 (%Δk/k)
66	3.87	2.68001
67	12.06	2.62477
68	16.45	2.60158
69	20.38	2.57978
70	25.85	2.54201
71	30.35	2.51327
72	35.46	2.48199
73	40.10	2.45488
74	44.93	2.42250
75	49.46	2.39461
76	54.61	2.35889
77	59.63	2.32458
78	63.97	2.29340
79	69.06	2.25520
80	73.66	2.22106
81	78.62	2.18403
82	83.58	2.14510
83	88.02	2.11045
84	87.93	2.11897
85	93.66	2.07467
86	93.68	2.08741
87	97.20	2.06372
88	96.33	2.08225
89	98.25	2.06952
90	97.73	2.08473
91	93.11	2.11945
92	88.12	2.16115
93	83.35	2.20120
94	78.52	2.24257
95	72.98	2.28656
96	68.90	2.31862
97	63.51	2.35886
98	58.21	2.39522
99	52.56	2.42943
100	48.48	2.45359
101	44.75	2.47499
102	39.92	2.50358
103	34.26	2.53639
104	29.26	2.56274

表2.4-7 第0 - 7サイクルの出力係数測定結果(2/2)

測定データ 番号	原子炉熱出力 (MW)	余剰反応度 (%Δk/k)
105	28.70	2.56691
106	22.28	2.60874
107	19.00	2.62685
108	14.03	2.65764
109	13.41	2.65763
110	19.18	2.61865
111	25.82	2.57834
112	30.38	2.55182
113	31.63	2.55850
114	35.12	2.53772
115	40.34	2.50131
116	45.08	2.47121
117	49.66	2.44335
118	55.73	2.40309
119	61.09	2.36801
120	69.10	2.31111
121	73.63	2.27875
122	78.88	2.23888
123	84.45	2.19865
124	89.15	2.16453
125	93.78	2.13182
126	99.46	2.09610

表2.4-8 第0 - 8サイクルの出力係数測定結果

測定データ 番号	原子炉熱出力 (MW)	余剰反応度 (%Δk/k)
127	3.83	2.70768
128	11.70	2.64815
129	16.47	2.61872
130	20.48	2.59338
131	25.33	2.57014
132	31.33	2.53408
133	35.41	2.51235
134	40.16	2.48805
135	44.81	2.46433
136	49.86	2.43621
137	49.50	2.46172
138	54.52	2.42760
139	59.01	2.39918
140	59.52	2.40059
141	63.17	2.37532
142	68.15	2.34292
143	73.94	2.30546
144	73.29	2.33832
145	78.94	2.28753
146	84.43	2.25140
147	89.47	2.21112
148	94.61	2.17382
149	98.71	2.14466

表2.4-9 第0-9サイクルの出力係数測定結果

測定データ 番号	原子炉熱出力 (MW)	余剰反応度 (%Δk/k)
150	2.65	2.25704
151	5.63	2.23924
152	10.46	2.20338
153	16.86	2.15884
154	21.54	2.13306
155	26.18	2.10909
156	30.54	2.08393
157	35.87	2.05238
158	42.67	2.01776
159	46.42	2.00089
160	51.30	1.97667
161	53.96	1.97639
162	60.97	1.93042
163	66.05	1.89789
164	70.77	1.86921
165	76.00	1.83758
166	79.82	1.80908
167	84.35	1.77986
168	89.44	1.74813
169	94.42	1.71647
170	99.15	1.68414
171	98.51	1.65355
172	93.80	1.68693
173	89.13	1.72060
174	84.62	1.75344
175	78.88	1.79336
176	74.49	1.82526
177	68.14	1.86481
178	63.43	1.89263
179	58.73	1.92000
180	52.25	1.95200
181	48.50	1.97053
182	49.30	1.97793
183	42.37	2.01406
184	39.17	2.02851
185	34.71	2.04903
186	29.75	2.07415
187	24.15	2.10208
188	19.74	2.12560
189	15.56	2.14913
190	11.06	2.17870

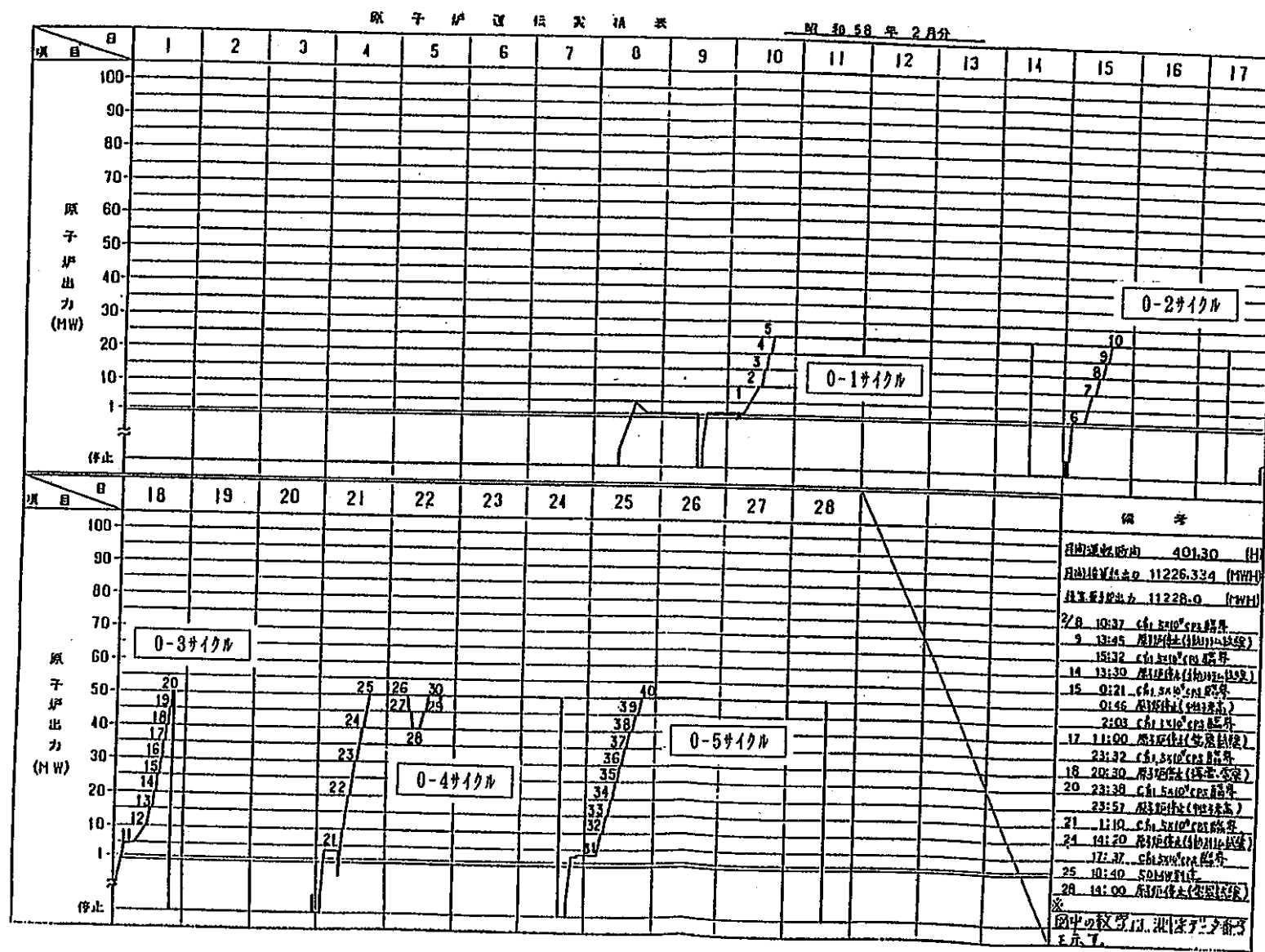


図2.4-1 第0サイクル出力上昇試験時の運転実績 (1/3)

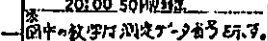


図2.4-1 第0サイクル出力上昇試験時の運転実績 (2/3)

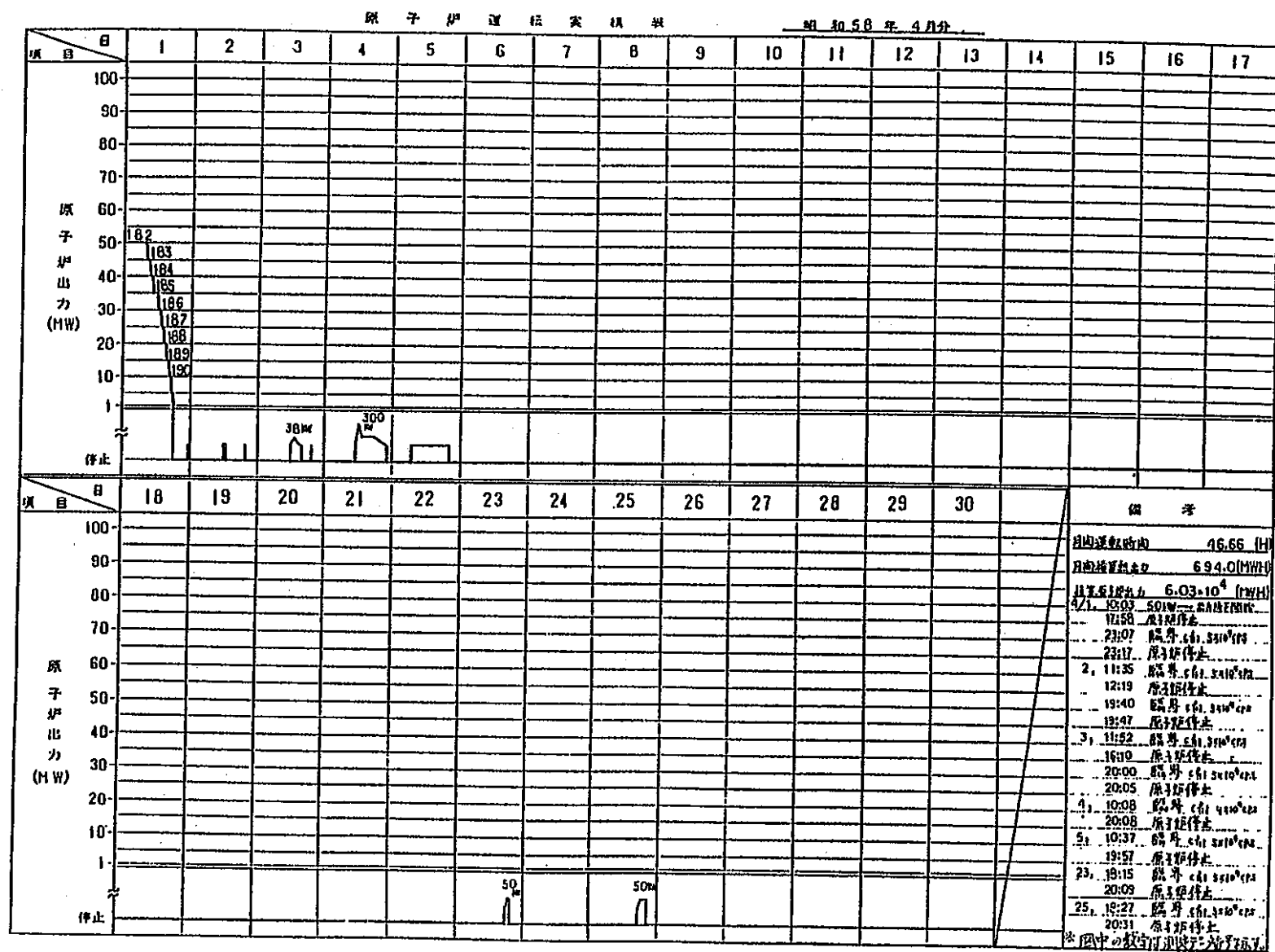


図2.4-1 第0サイクル出力上昇試験時の運転実績 (3/3)

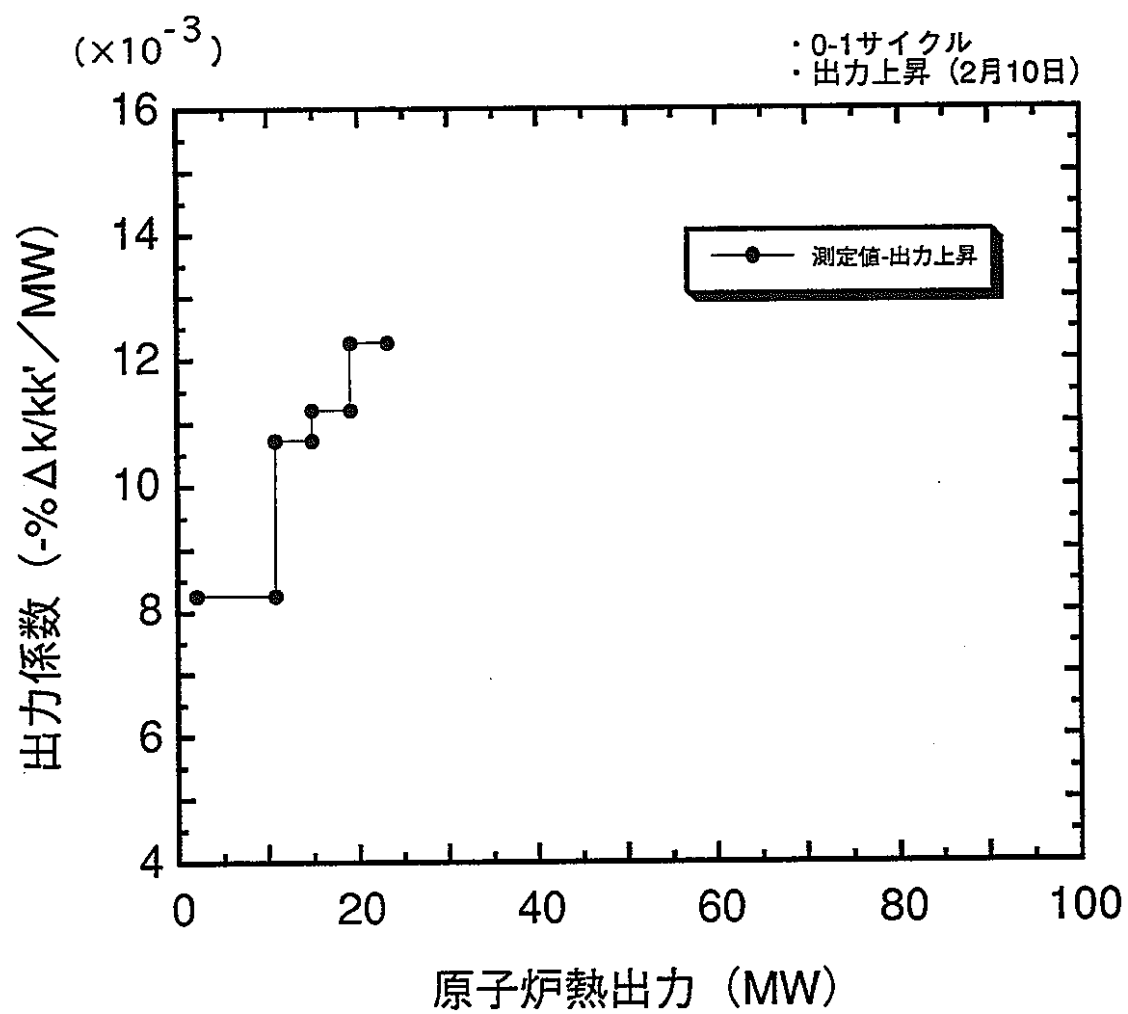


図2.4-2 第0-1サイクルの出力係数測定結果

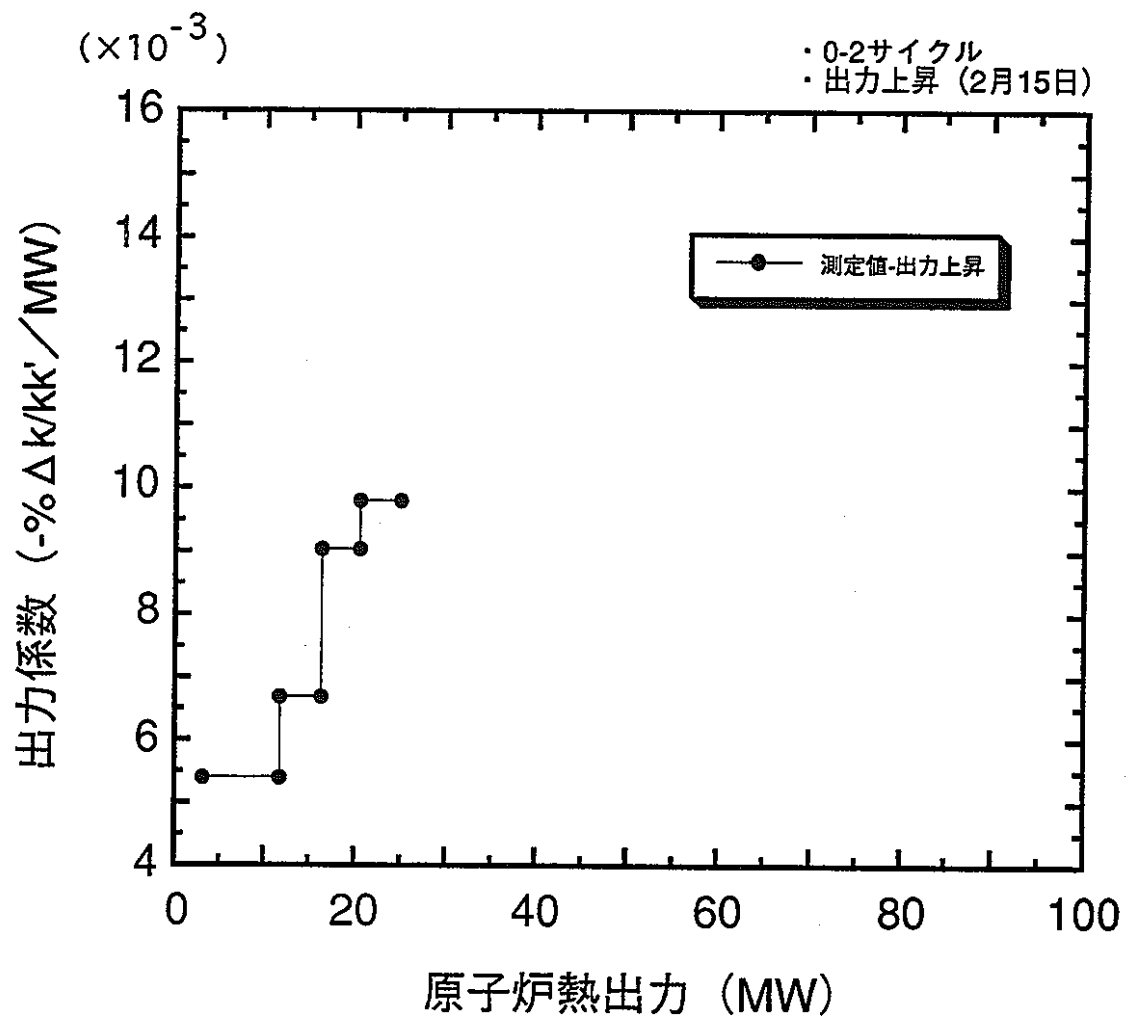


図2.4-3 第0-2サイクルの出力係数測定結果

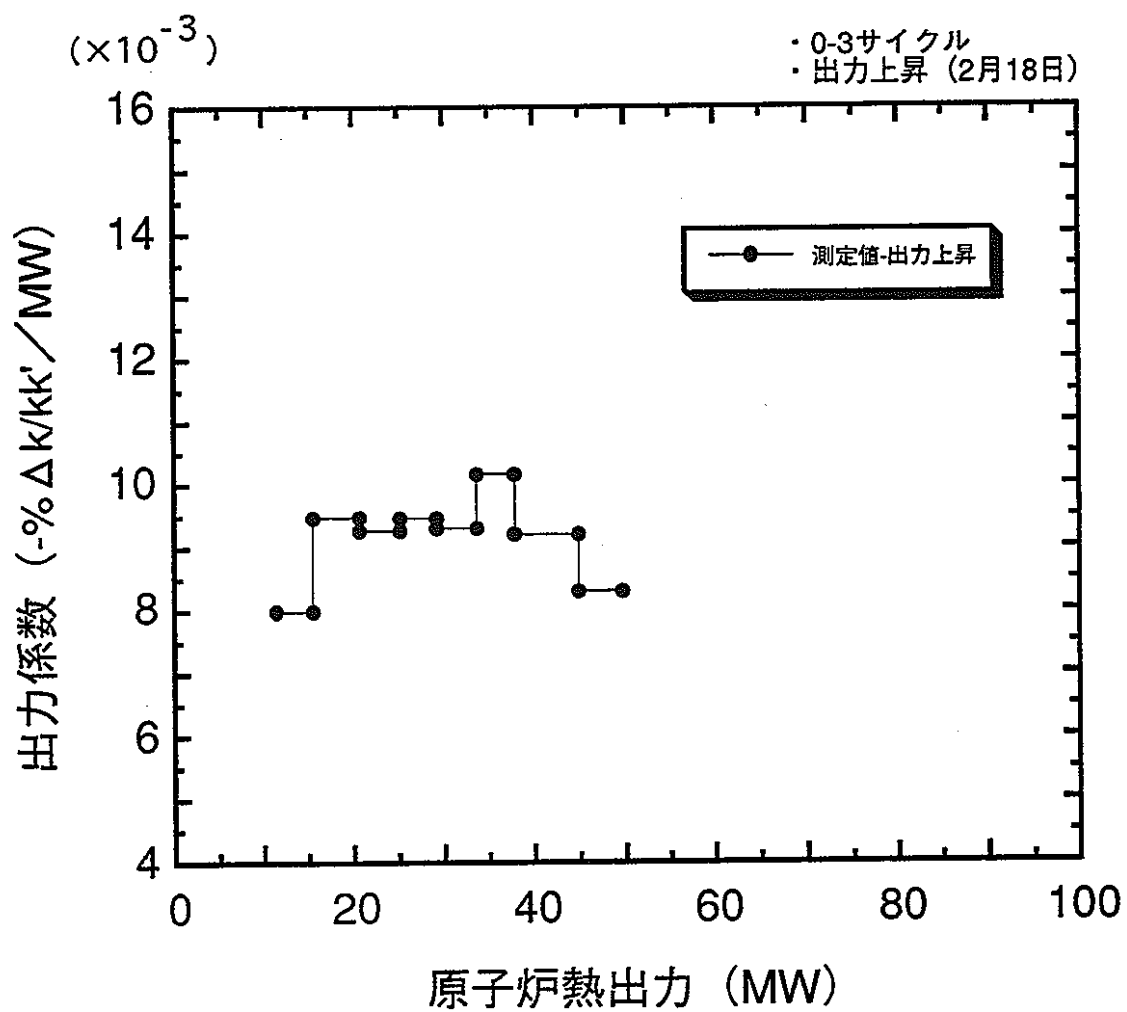


図2.4-4 第0-3サイクルの出力係数測定結果

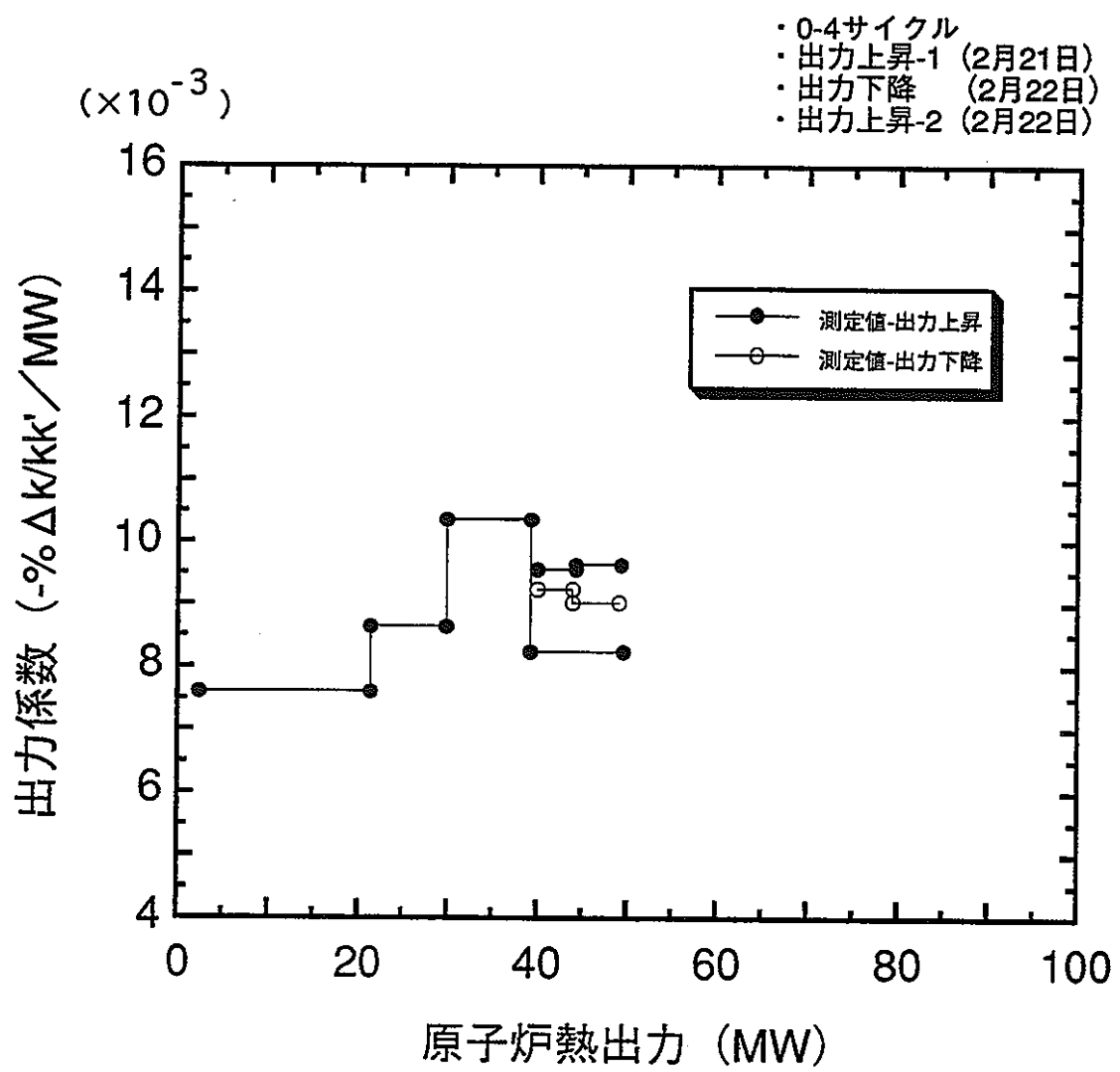


図2.4-5 第0-4サイクルの出力係数測定結果

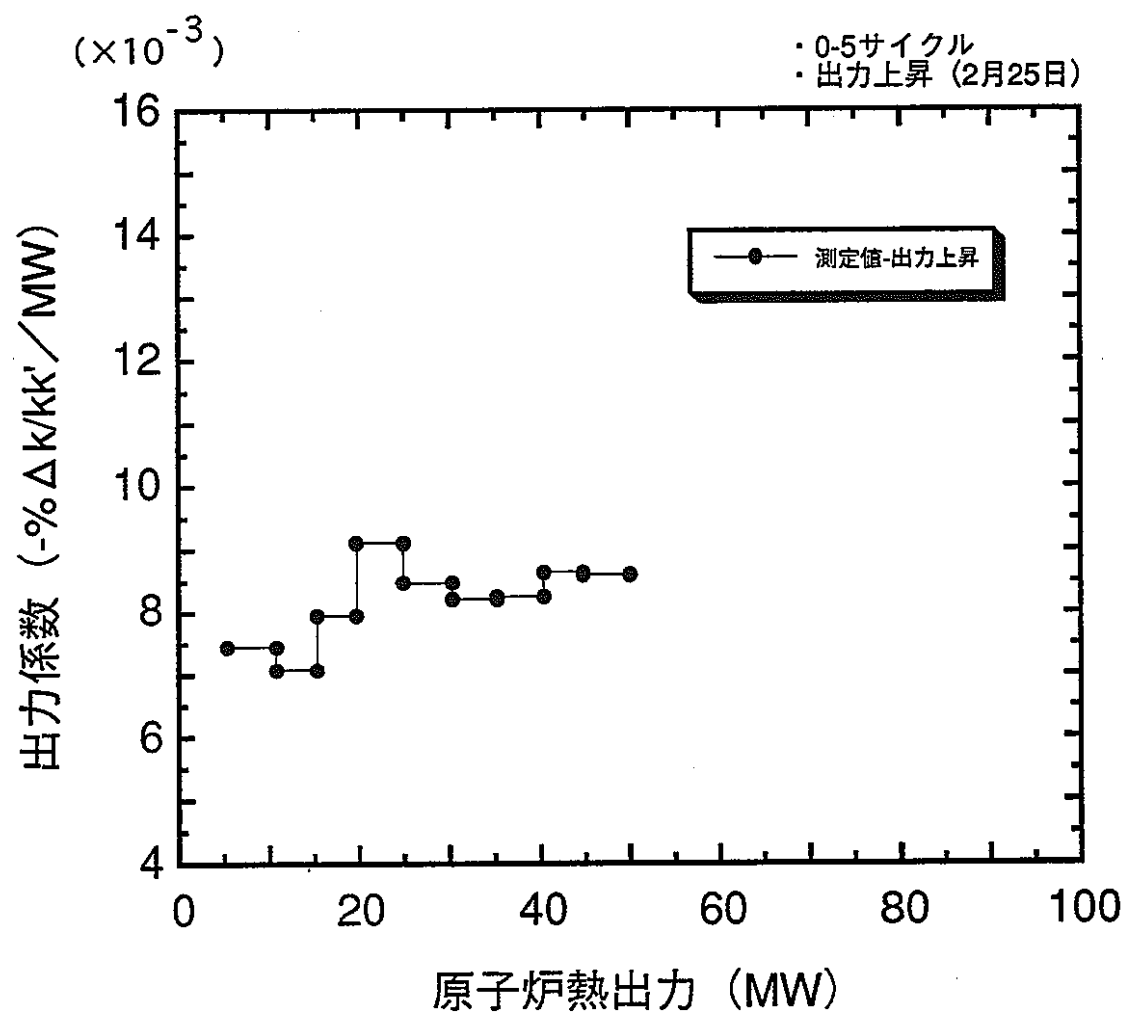


図2.4-6 第0-5サイクルの出力係数測定結果

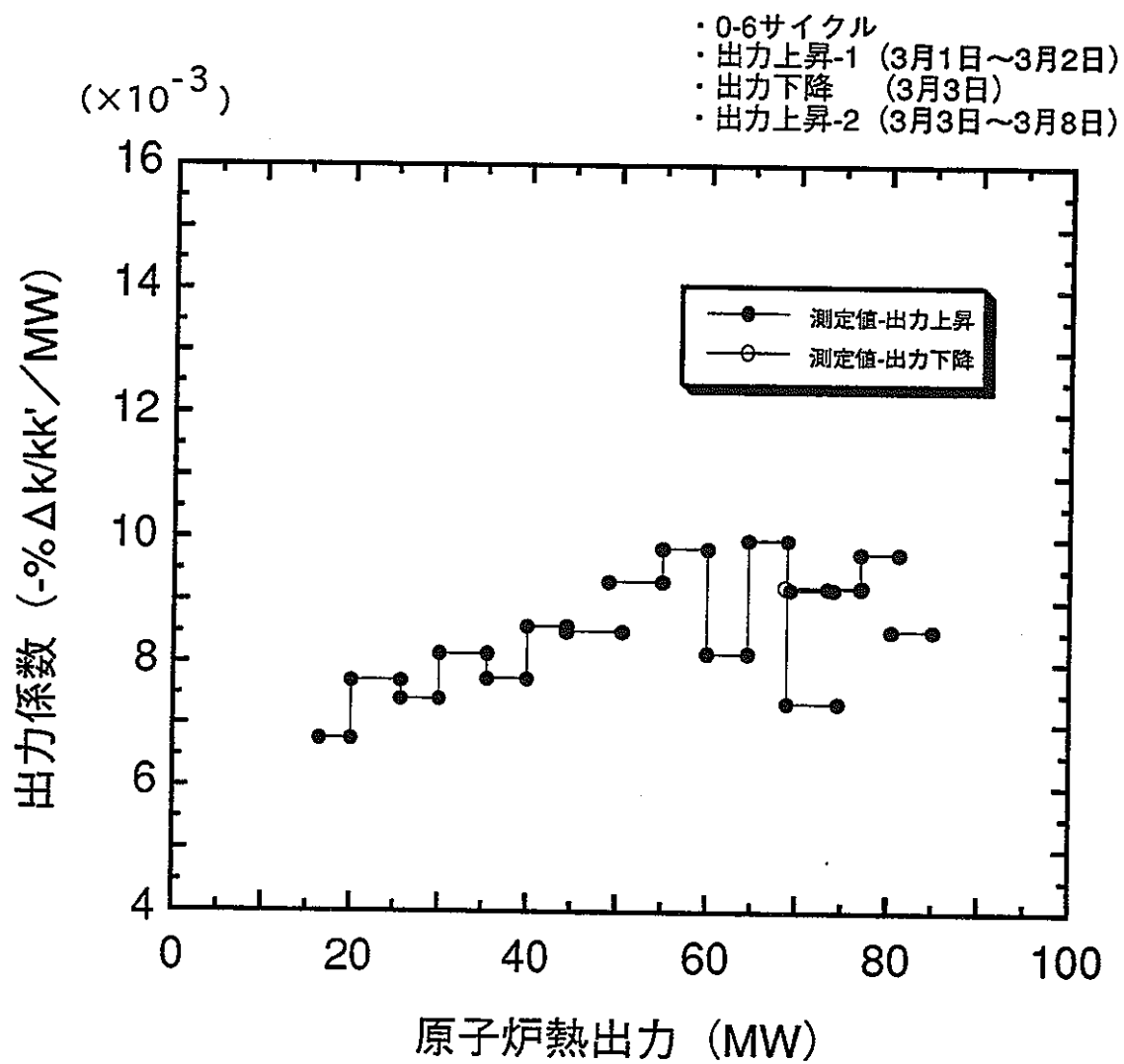


図2.4-7 第0-6サイクルの出力係数測定結果

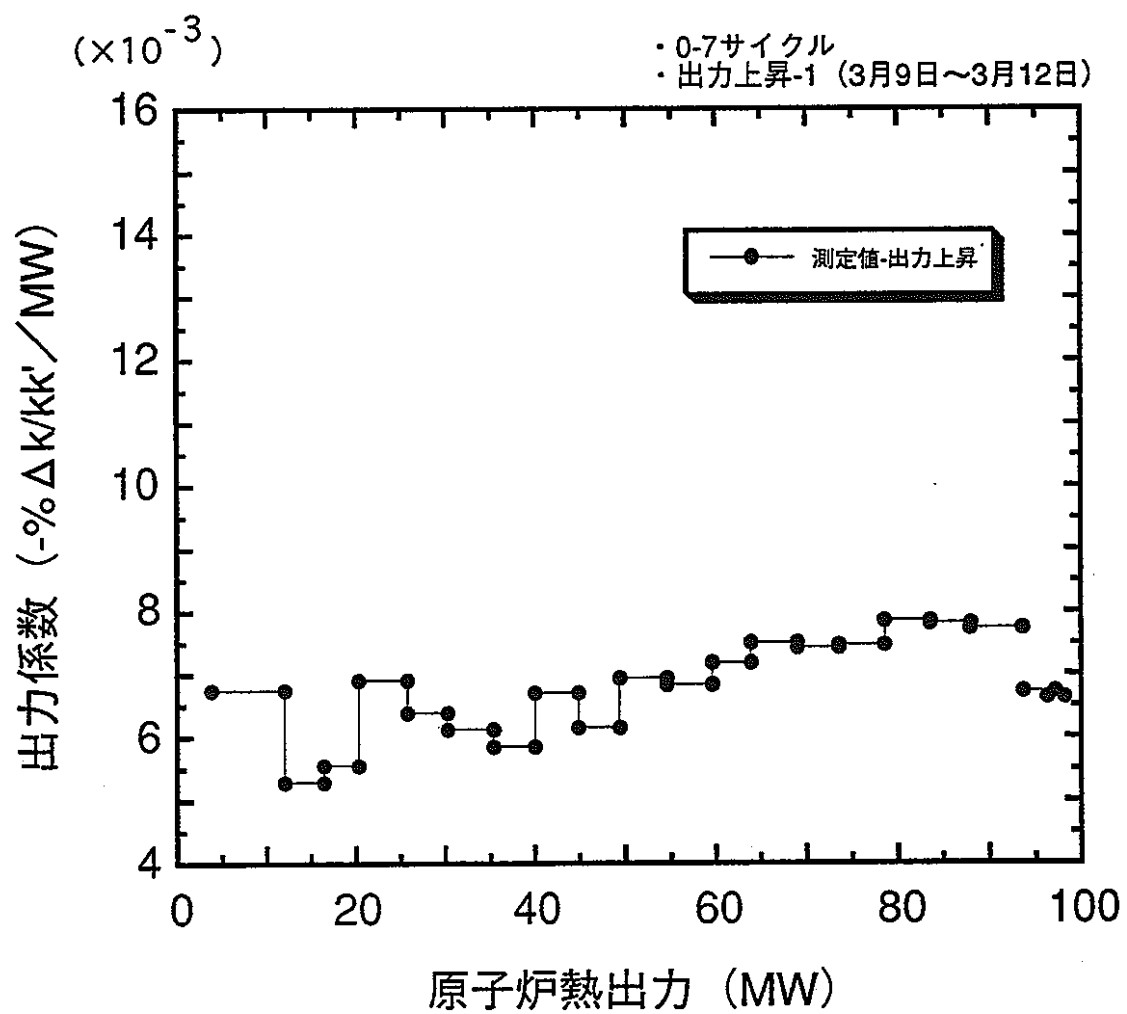


図2.4-8 第0-7サイクルの出力係数測定結果(1)

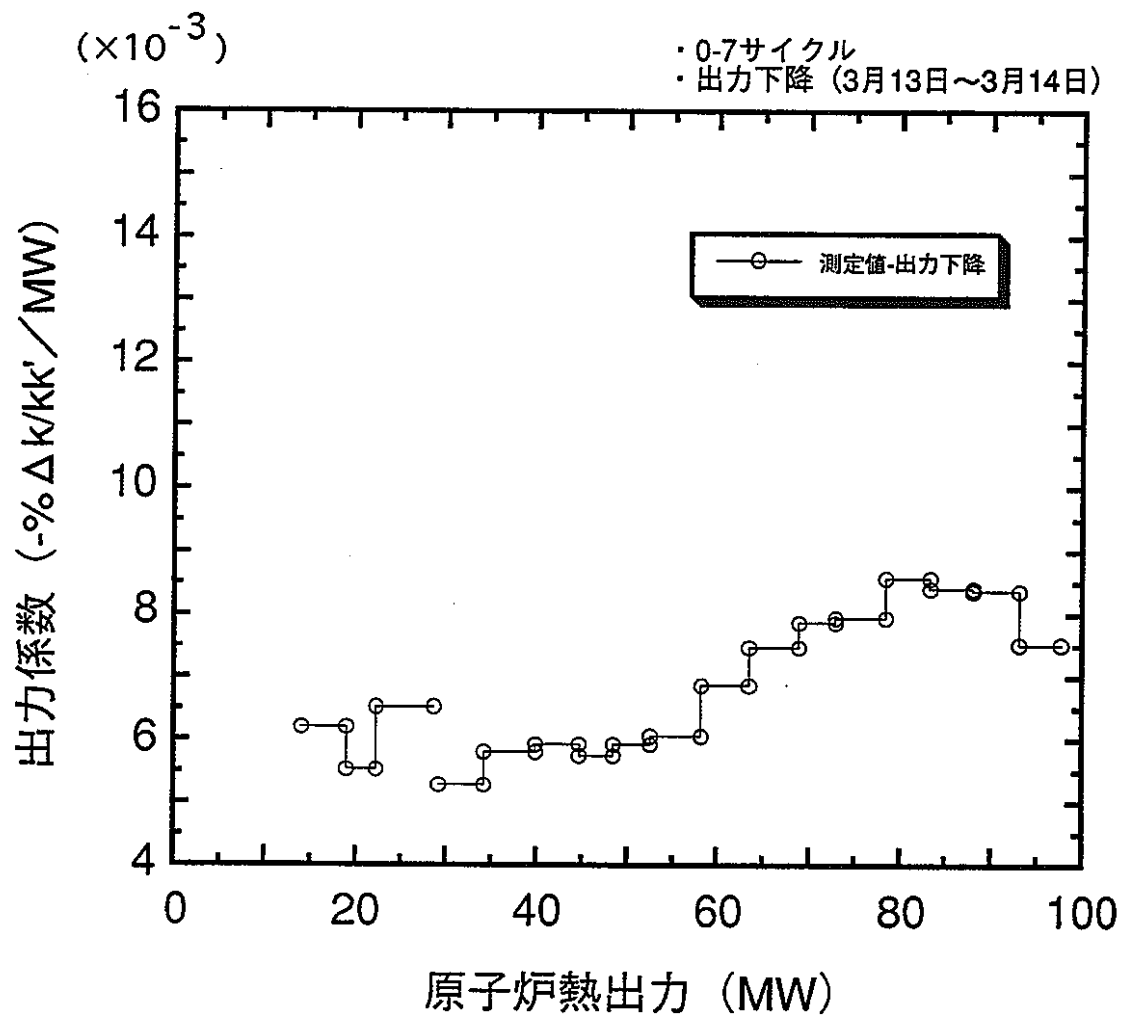


図2.4-9 第0-7サイクルの出力係数測定結果(2)

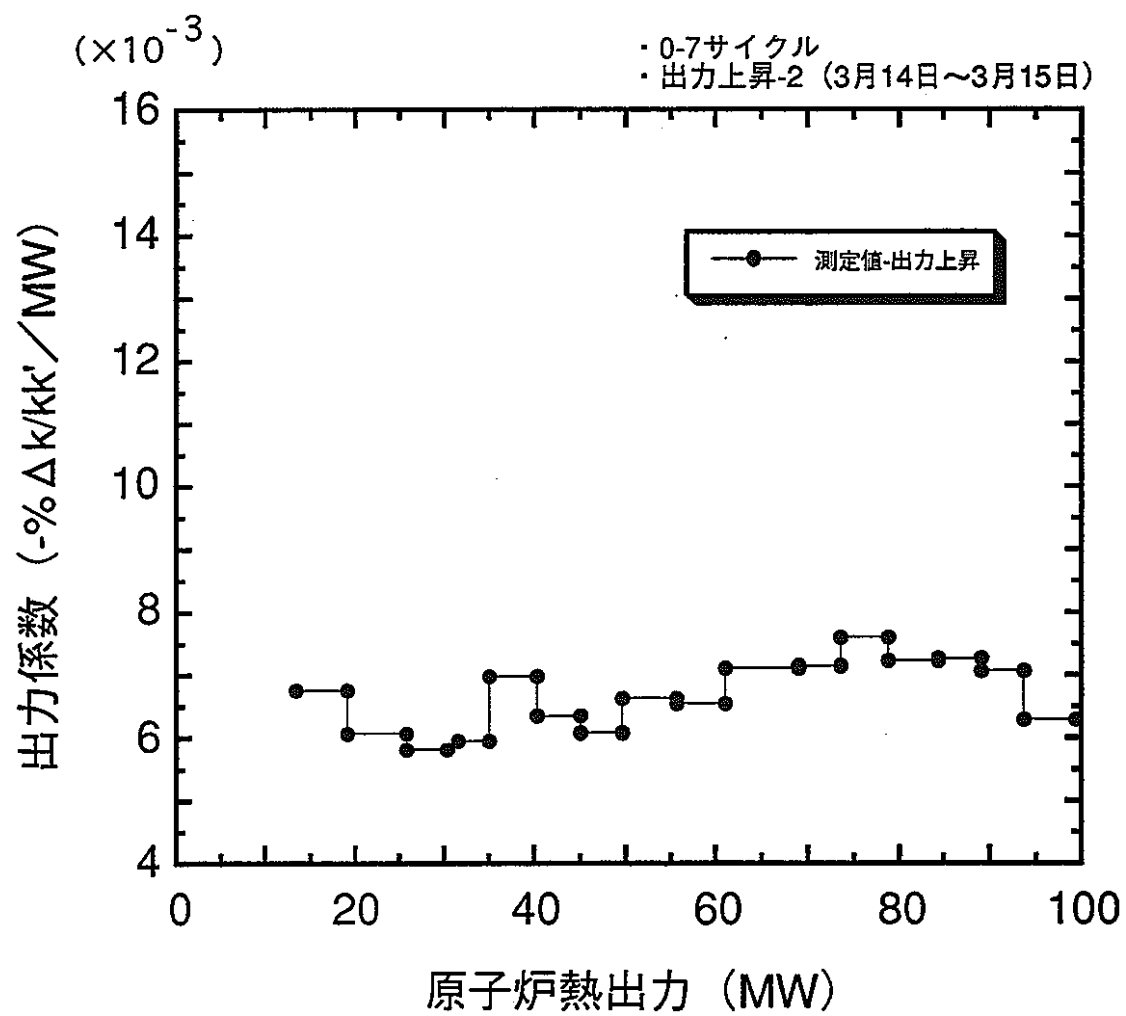


図2.4-10 第0-7サイクルの出力係数測定結果(3)

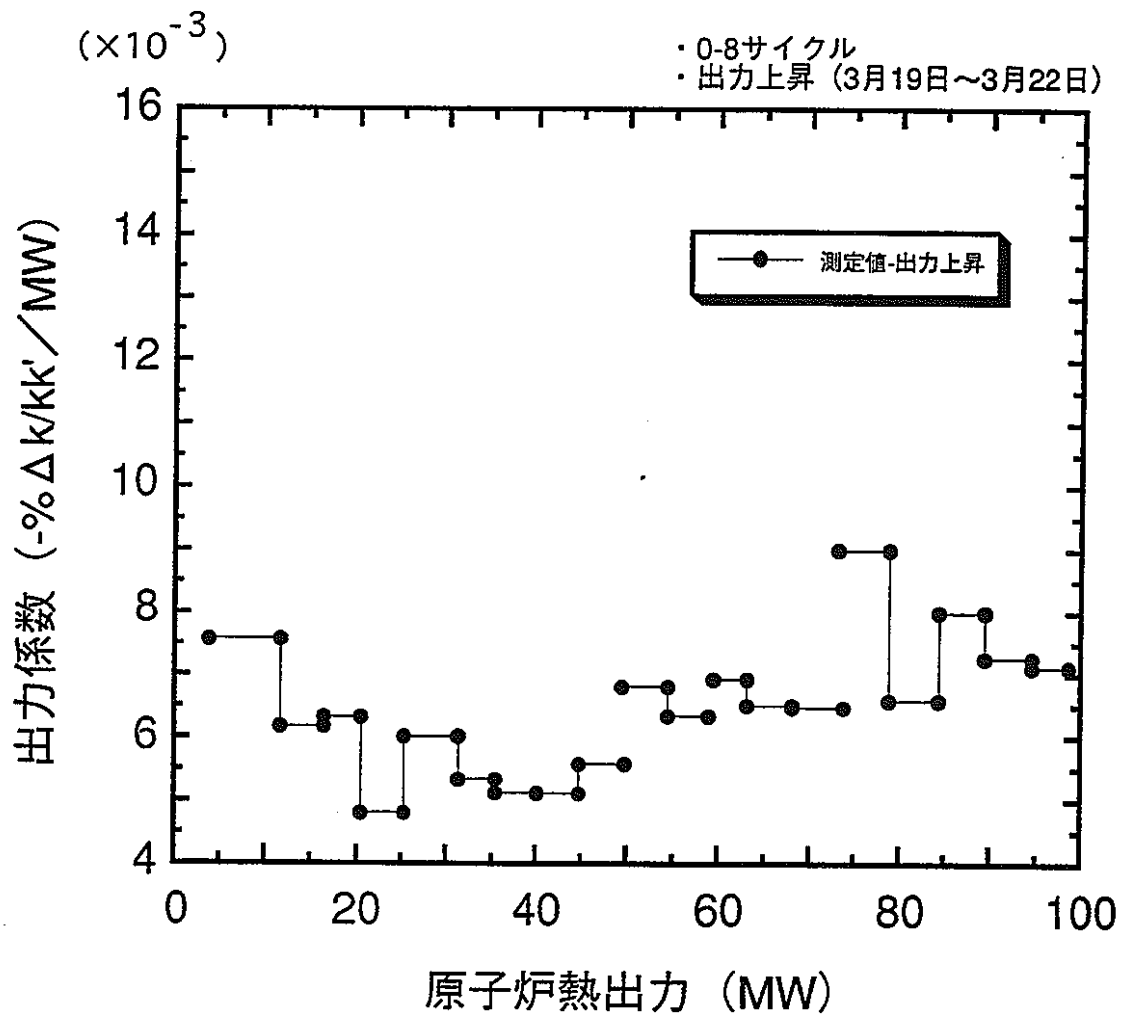


図2.4-11 第0-8サイクルの出力係数測定結果

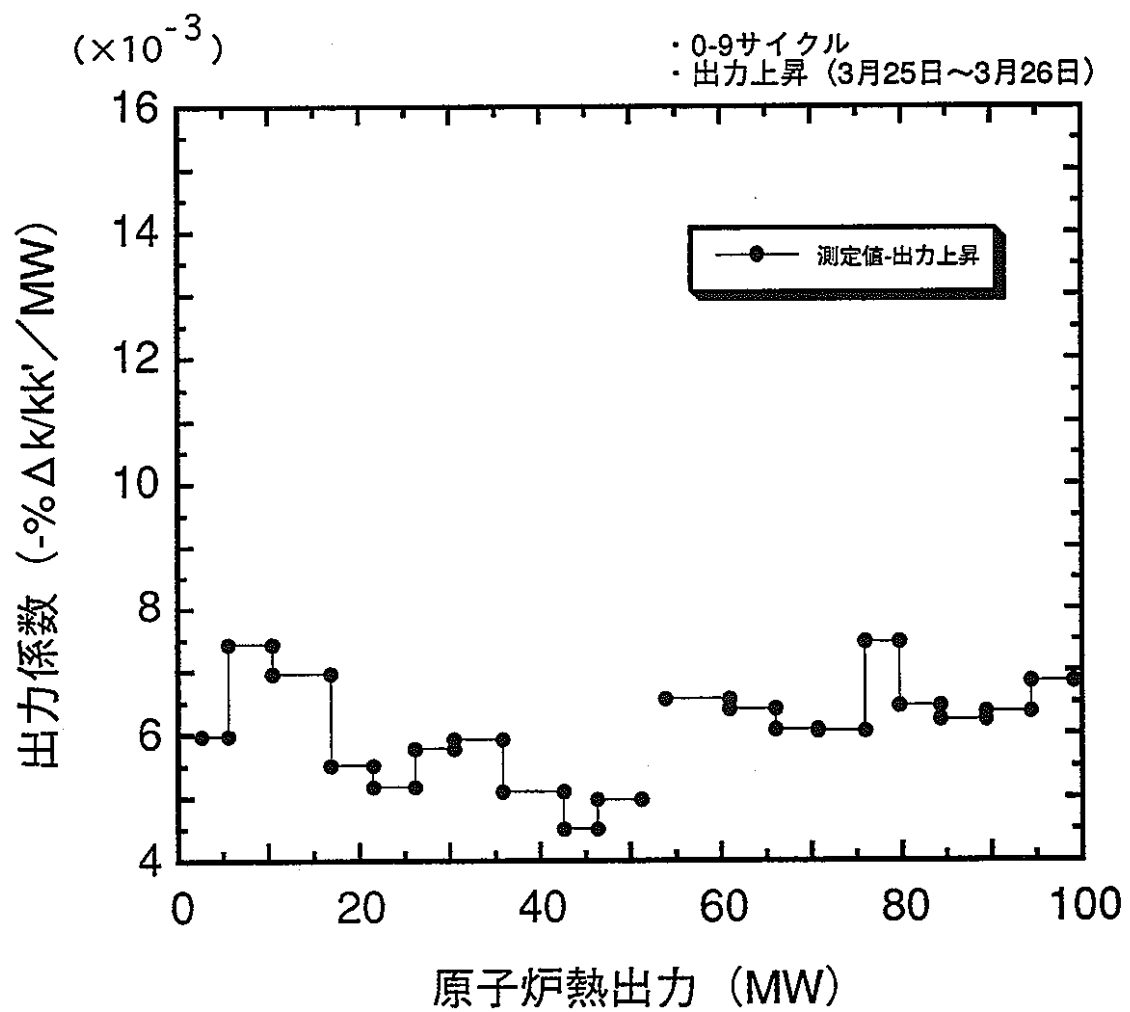


図2.4-12 第0-9サイクルの出力係数測定結果(1)

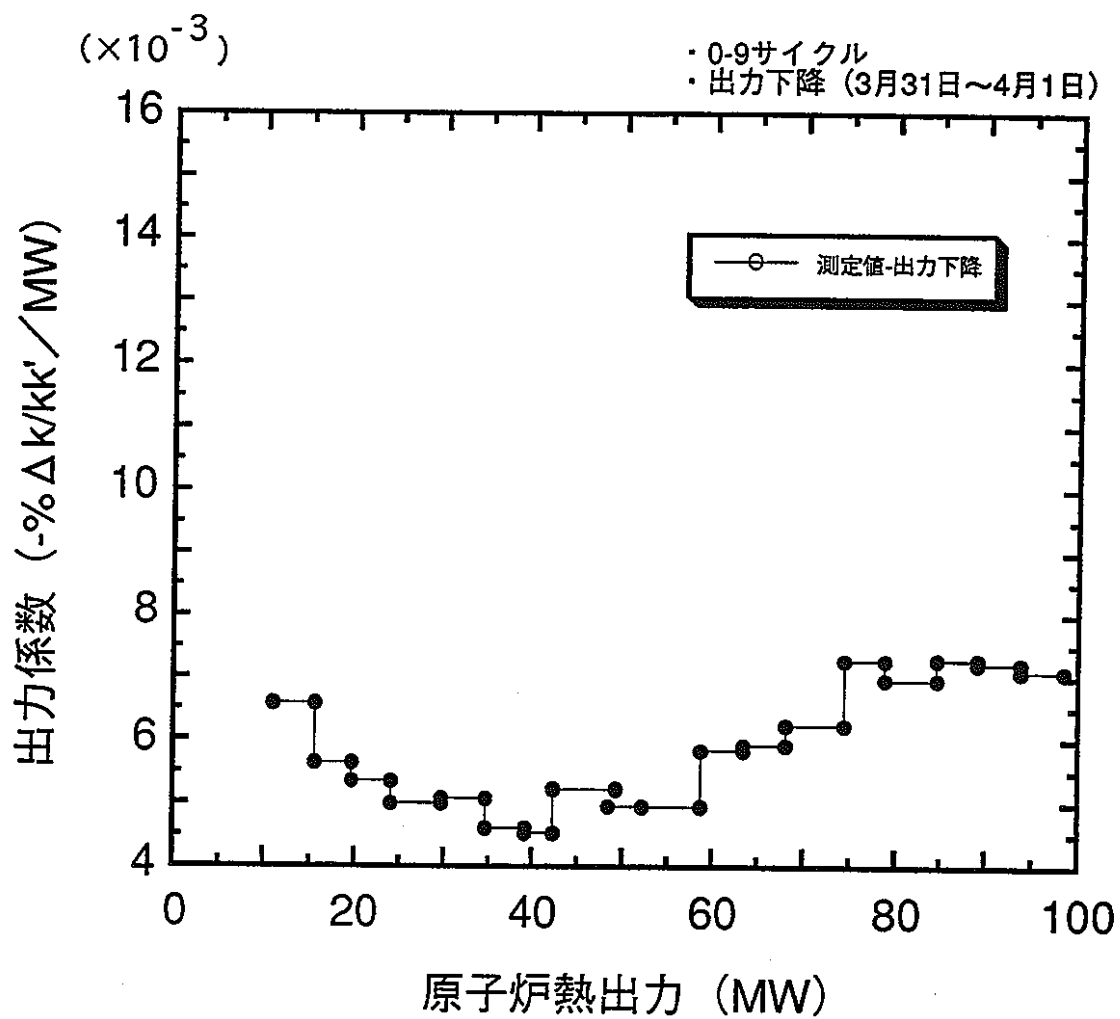


図2.4-13 第0-9サイクルの出力係数測定結果(2)

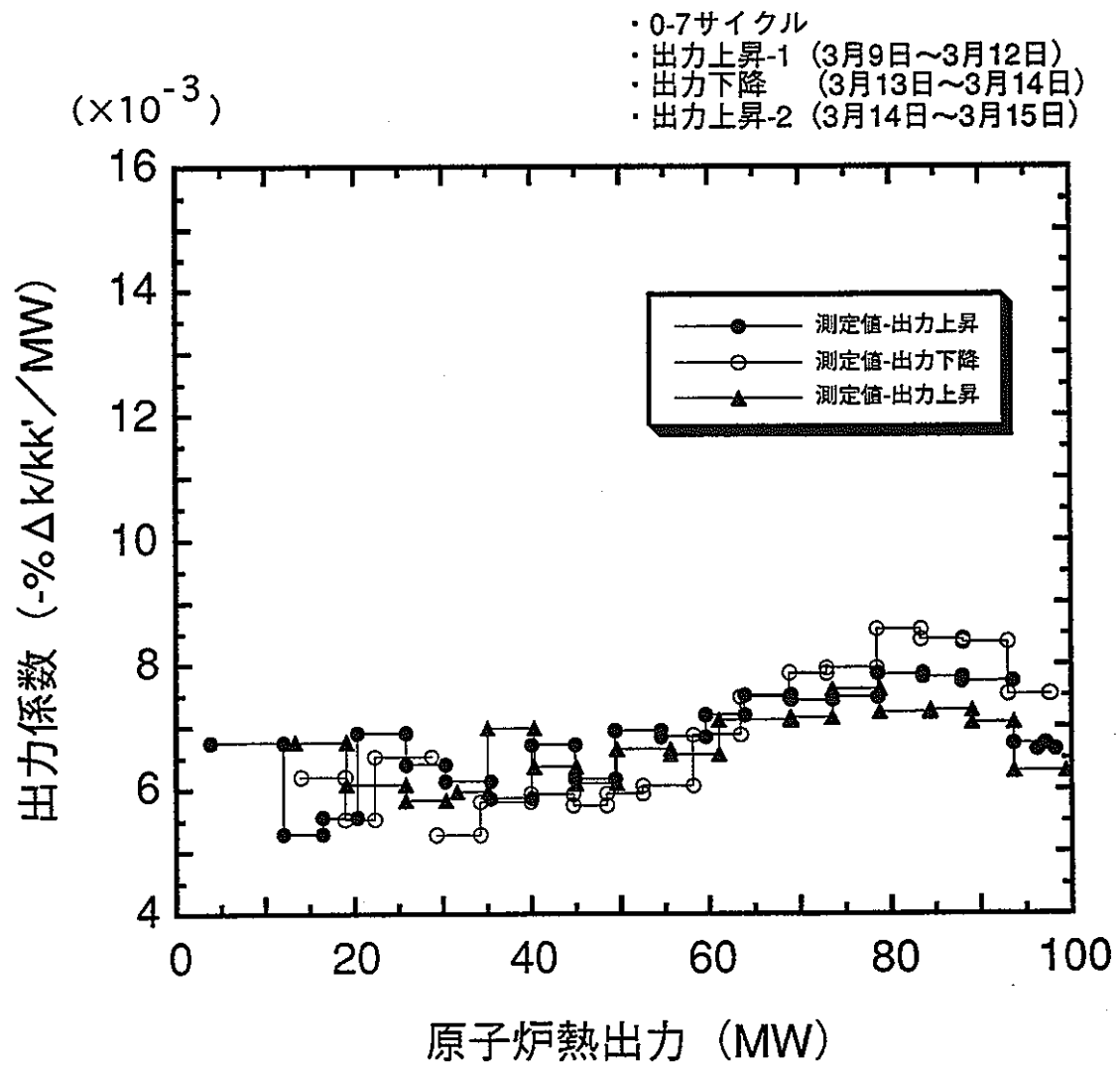


図2.4-14 第0-7サイクルの出力係数測定結果
 (出力上昇時と出力下降時の比較)

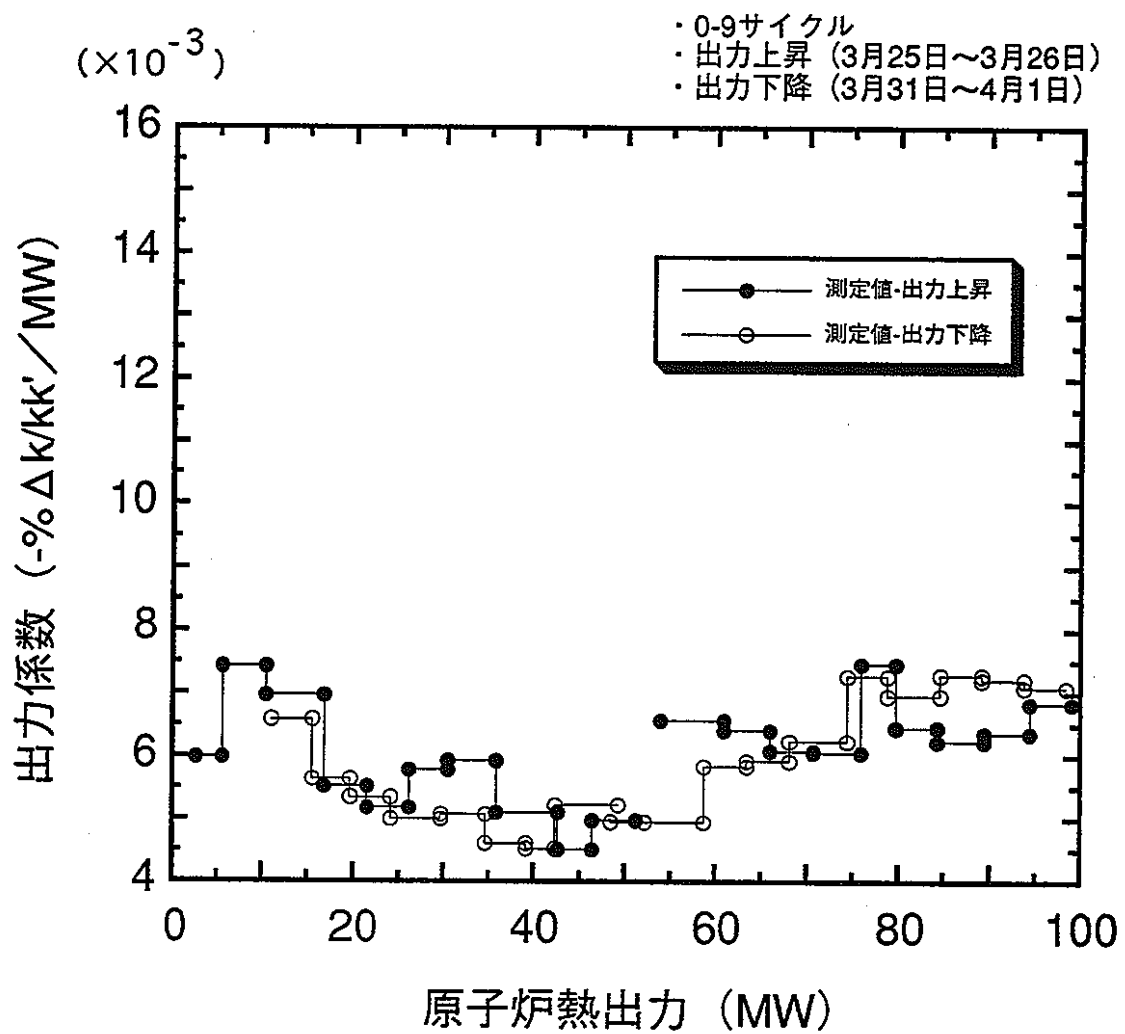


図2.4-15 第0-9サイクルの出力係数測定結果
(出力上昇時と出力下降時の比較)

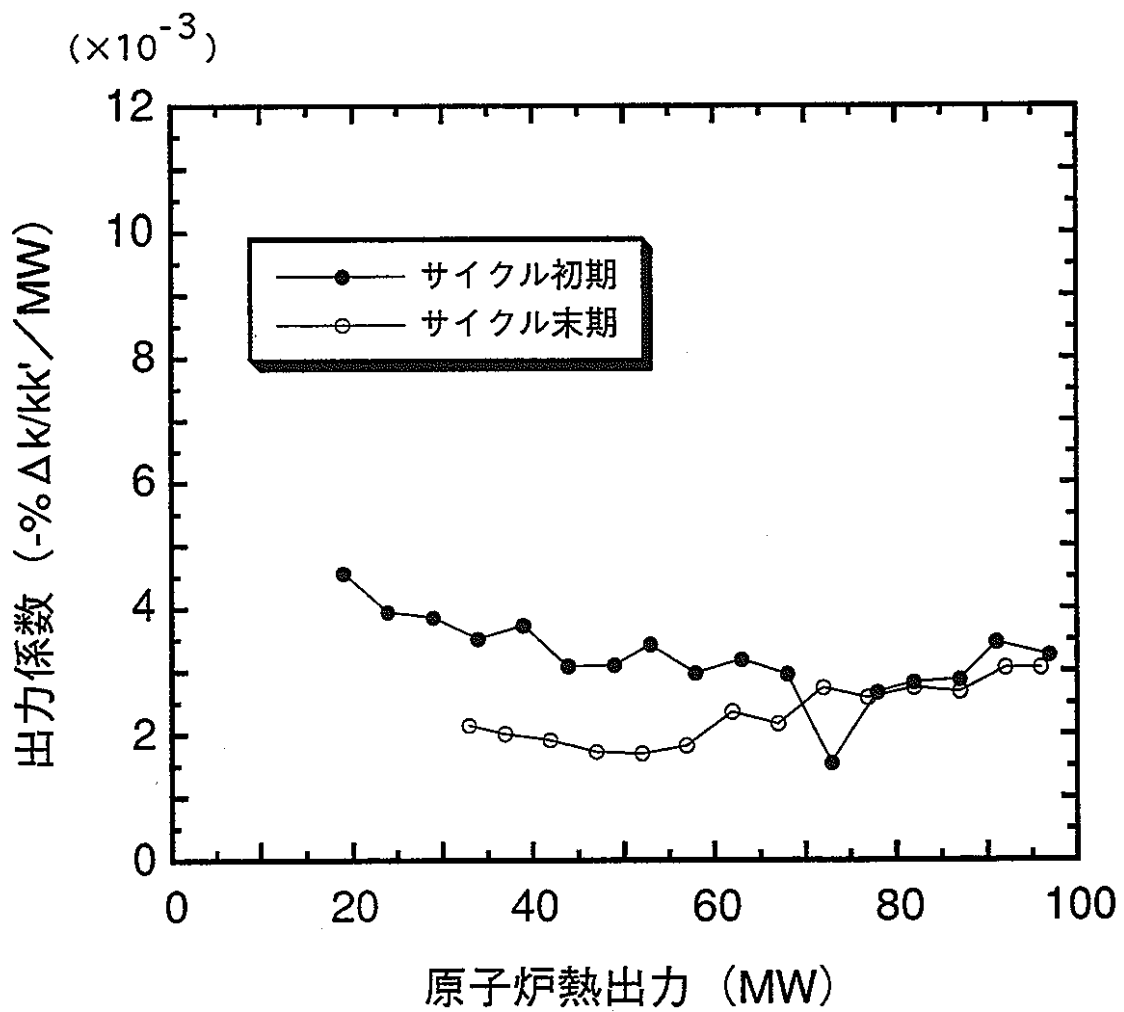


図2.4-16 第27サイクルの出力係数測定結果

2.5 温度評価

出力係数の解析で使用する温度評価について示す。本検討では、燃料ピンの照射履歴を考慮した燃料挙動解析を行い温度評価に反映した。本解析では、HEDLで開発されEBR-IIの照射データを豊富に取り入れているS I E Xコードを使用した。また、S I E Xコードは「常陽」MK-IIの出力係数評価（SJ 201 81-19 「常陽」性能試験結果の核的重要事項の詳細解析）で使用している。

2.5.1 解析方法

ここでは、出力係数の解析における温度評価に使用したS I E Xコードについて簡単に示す。

1) 概要

S I E Xは酸化物燃料ピンの照射履歴を考慮して、熱・変形挙動解析を行うコードである。S I E Xで扱われる燃料ピンの一般的ジオメトリを図2.5-1に示す。燃料ピンは軸方向には等分割され、各セグメントで径方向一次元熱伝導方程式を解く。各セグメント毎に計算される特性値は、次のとおりである。

- a) 冷却材温度
- b) 被覆管内外面温度
- c) ギャップ熱伝達係数
- d) 燃料ペレット内外面温度
- e) 燃料再組織化領域半径
- f) 燃料および被覆管の熱膨張、スウェリングによる変形
- g) F P ガスの生成と放出

上記項目のうち、従来の熱設計手法と大きく異なるのはギャップコンダクタンスの評価法である。炉心熱設計には従来、工学的判断から一定値を採用してきたが、S I E Xのモデルでは非常に複雑な相関式となっ

ている。S I E Xを用いたのは照射履歴を温度評価に反映させることを目的としており、これは結局ギャップコンダクタンスの評価に、ギャップ幅の変動、F Pガスの放出等の効果を含めることに帰着する。

以下にS I E Xの特徴的な部分について項目別に示す。

2) 被覆管の熱膨張およびスウェリングによる寸法変化 (C D E L D)

被覆管の熱膨張は、温度に関する線形関数で計算される。つまり、径方向変化としては次式で表される。

$$\frac{\Delta L}{L} = (\alpha_0 + \alpha_T T)(T - T_R)$$

T_R : 室温

被覆管のスウェリングについては、次式を用いる。

< SUS-316 (20%冷間加工) >

$$\frac{\Delta V}{V_0} = f(T) \{ \phi t \}^{N(T)}$$

$$f(T) = \frac{e^C}{1+e^C} \left\{ \frac{0.0022}{1+e^A} + \frac{0.006}{1+e^B} \right\}$$

$$N(T) = \frac{2+3e^D}{1+e^D}$$

$$A = 0.05(T-600)$$

$$B = 0.06(T-460)$$

$$C = 0.09(T-340)$$

$$D = 0.05(T-475)$$

T : 温度 ($^{\circ}\text{K}$)

ϕt : フルエンス ($\text{n/cm}^2 \times 10^{-22}$) ($E > 0.1 \text{ MeV}$)

被覆管半径は、次式から計算される。

$$r^{c'} = r_0 \left(1 + \frac{\Delta L}{L} \right) \left(1 + \frac{\Delta V}{3V} \right)$$

r_0' : 製造時半径

3) 燃料ペレットの形状変化 (F D E L D)

燃料熱膨張は、体積膨張による径方向平均変化として計算する。各径方向ノードでの変位は、次式による熱膨張係数を使って計算される。

$$\alpha' = \alpha_0' + \alpha_T' T$$

体積平均熱膨張は、次式から計算される。

$$\begin{aligned} \left\langle \frac{\Delta D}{D} \right\rangle_{ov} &= \frac{\int (\Delta D/D) r \, dr}{\int r \, dr} \\ &= \frac{\int_{r_c}^{r_0} (\alpha_0' + \alpha_T' T) r \, dr}{\int_{r_c}^{r_0} r \, dr} \end{aligned}$$

燃料スウェリング ΔD_s は、実験式ルーチン F S W E L から計算される。
運転時における燃料半径は、次式から求める。

$$r'' = (r_0' + \Delta D_s) \left(1 + \left\langle \frac{\Delta D}{D} \right\rangle_{ov} \right)$$

r'' : 運転時燃料 (Hot Fuel) 半径

4) ギャップ幅の相互関係 (F S W E L)

ギャップコンダクタンスの評価のためにギャップ幅の相関式が E B R-II の測定データから測定された。

このモデルにおけるギャップ幅は局所線出力、燃焼度、製造時ギャップ幅、運転サイクルに依存するという形式である。

$$G = G_0 \{ 1 - [\alpha (1 - e^{-G_3 C}) + G_4 (1 - e^{-G_5 q B}) + (G_5 - \alpha) (1 - e^{-G_7 B})] \}$$

$$\alpha = G_1 q (q - G_2)$$

G : 運転停止時ギャップ (Cold Gap) (cm)

G_0 : 製造時ギャップ (cm)

q : 局所線出力 (W/cm)

B : 局所燃焼度 (MWd/t)

C : 運転サイクル数

G₁~G₇ : 定数 (表2.5-1 (2/4)を参照)

ここで、第1項は運転サイクル依存性を示し、ペレットクラッキングの効果を含む。第2項はF Pガスによるスウェリング効果を、また、第3項は個体F Pによるスウェリング効果であると解釈できる。

5) 燃料-被覆管 ギャップ熱伝達係数 (H G A P)

S I E Xコードでは、Ross and Stoute のギャップコンダクタンスモデルを単純化した。H G A Pのフローチャートを図2.5-2 に示す。

ギャップコンダクタンスモデルは、3つの独立したパラメータを有し、これらは照射後データに対するキャリブレーションで評価されている。

燃料と被覆管の接触がないときは；

輻射熱伝達+ギャップを通しての熱伝導

燃料と被覆管が接触しているときは；

上記要因+燃料と被覆管表面での固-固体熱伝導

この場合、接触していても接触部にはガスのトラップ"pockets"を通しての熱伝達が存在する。

① 熱輻射伝達

輻射による2つの同心円筒の場合の熱伝達の関係としては；

$$\frac{q_i}{A_f} = \sigma \left[\frac{1}{\varepsilon_f} + \frac{A_f}{A_c} \left(\frac{1}{\varepsilon_c} - 1 \right) \right]^{-1} [T_f^4 - (T_c^i)^4]$$

T_f, T_cⁱ : 燃料と被覆管の表面温度 (°K)

A_f, A_c : " の単位長さ当たりの伝熱面積

ε_f, ε_c : " の放射率

σ : Stefan Boltzman 定数

従って、ギャップ熱伝達係数としては、

$$H_r = \frac{q_i/A_f}{T_f - T_{c,i}}$$

$$\therefore H_r = \sigma \left[\frac{1}{\varepsilon_f} + \frac{A_f}{A_c} \left(\frac{1}{\varepsilon_c} - 1 \right) \right]^{-1} [T_f^2 + (T_{c,i})^2] [T_f + T_{c,i}]$$

② ギャップ内ガスを通しての熱伝達

Ross and Stoute のガスギャップ熱伝達は、次式で与えられる。

$$H_{gas} = \frac{k_m}{C + (g_f + g_c) + GAP}$$

k_m : ギャップ内混合ガスの熱伝導率

GAP : 運転時ギャップ幅 (Hot Gap 幅)

g_f, g_c : Jump Distance

C : 燃料と被覆管の表面粗さを扱う項

Jump Distance g_f, g_c は、表面とガス間におけるエネルギー変換の不完全さの結果として、燃料と被覆管の表面における温度上昇を表す。

これを次のように表す。

$$g = \frac{2-a}{a} \sqrt{(2\pi R_m T)} \frac{k_m}{(1+\gamma) C_v P_f}$$

a : エネルギー変換領域を反映した補正係数

R_m : 混合体のガス定数

P_f : ギャップガス圧

γ : C_p/C_v

T : g_f に対する燃料表面温度、または、

g_c に対する被覆管表面温度

C_v : 混合体の定積比熱

この表示による g_f, g_c の和を結合すると、

$$g_f + g_c = \frac{2-a}{a} \frac{\sqrt{2\pi R_m}}{(1+\gamma)C_v P_p} [k_m^f \sqrt{T_f} + k_m^c \sqrt{T_c}]$$

上式を簡単に $\bar{T} = 1/2(T_f + T_c)$, $\bar{k}_m = k_m(\bar{T})$ として最後の項を

$2\bar{k}_m \sqrt{\bar{T}}$ とおくと、

$$g_f + g_c = \frac{2-a}{a} \frac{\sqrt{2\pi R_m}}{(1+\gamma)C_v P_p} \bar{k}_m \sqrt{\bar{T}}$$

以下の定数値を使用する。

$$(1+\gamma) = 1.659$$

$$R_m = 8.308/\bar{W}$$

$$C_v = 2.988/\bar{W}$$

$\bar{W}$: 混合ガス平均原子量

従って、

$$g = (g_f + g_c) = 1373 \frac{2-a}{a} \frac{\bar{k}_m \sqrt{\bar{T} \cdot \bar{W}}}{P_p} \quad (\text{cm})$$

補正係数 a は、次のように表せる。

$$a = A_1 e^{(-[\ln(\bar{W}) - A_2]^2 / A_3)}$$

A_1, A_2, A_3 : 実験から得られた係数 (表2.5-1 (4/4)を参照)

補正係数 C は、次のように実験から決められている。

$$C = HG_1 e^{(HG_2 P_p)}$$

$$e^{(HG_2 P_p)} > e^{(-EFPD \cdot HG_4)} \text{ のときは、}$$

$$C = HG_1 e^{(-EFPD \cdot HG_4)}$$

P_p : 混合ガス圧 (dyne/cm²)

HG_1, HG_2, HG_4 : (表2.5-1 (2/4)を参照)

③ ガス熱伝導度： k_m

ギャップ内混合ガスの組成としては、He, N, Ar, Xe, Kr を考慮している。

各ガスの熱伝導度を温度の2次関数で表現する。

$$k_i = A_i + B_i T + C_i T^2$$

A_i, B_i, C_i : 定数 (表2.5-1 (2/4) を参照)

ガス混合物の熱伝導度は、"Brokaw's"法則を使って、

$$k_m = \frac{1}{2} \left(\sum X_i k_i + \frac{1}{\sum X_i k_i} \right)$$

X_i : mols 割合

以上述べたように、ギャップコンダクタンスは種々の原因と相関により変動する。それらの関係を図2.5-3 に示す。

④ 固-固熱伝達係数

Ross and Stoute モデルでは、固-固熱伝達係数を以下のように書き表す。

$$H_s = \frac{k_s P}{A_0 \sqrt{(r)H}} \quad (\text{W/cm}^2\text{°C})$$

$$k_s = \frac{2k_c k_f}{k_c + k_f} \quad (\text{W/cm}^2\text{°C})$$

$$r = \sqrt{\left[\frac{1}{2} (r_c^2 + r_f^2) \right]} \quad (\text{cm})$$

P : 接触圧 (dyne/cm^2)

H : Meyer硬化 (dyne/cm^2)

A_0 : フィティング定数 $(\sqrt{\text{cm}})$

k_s : 有効個体熱伝導度 $(\text{W/cm}^2\text{°C})$

上記表示式に粗さの項とBrinelli硬化を代入して簡単化すると、

$$H_s = \frac{Ak_s P}{Y}$$

Y : 被覆管の降伏応力

A : データ相関より決まるパラメータ

$$A = A(Y, A0, \sqrt{r}), \text{Brinelli硬化}$$

6) 燃料再組織変化 (STRUCT)

SIEXでは粒界成長 (Grain Growth) 温度を入力とし、いわゆる3領域モデルを採用している。

ただし、次のように線出力に依存する粒界成長温度のモデルも選択できる。

$$T_{c.o.} = Fr_1 - Fr_2 W$$

$$T_{e.q.} = Fr_3$$

$T_{c.o.}$: 柱状晶生成温度 (°C)

$T_{e.q.}$: 等軸晶生成温度 (°C)

W : 局所線出力 (W/cm)

Fr_1, Fr_2, Fr_3 : 定数 (表2.5-1 (3/4) 参照)

STRUCTのフローチャートを図2.5-4 に示す。

7) FPガス放出の相互関係 (FISGAS)

SIEXにおける核分裂生成物 (以下FPと記す) ガス放出モデルの仮定は、

- ① 粒界成長領域では、生成されたFPガスは殆ど残留しない。
- ② 燃料再組織変化が起こらない領域では、相当量のFPガスが保持され、放出は熱と照射による拡散プロセスに従っている。
- ③ 放出されるFPガスの割合は次式で与えられる。

$$F = FrAr + FuAu$$

Fr : 再組織変化が起こった領域の F P ガス放出割合

Fu : 再組織変化が起こっていない領域の F P ガス放出割合

Ar : 再組織変化が起こった領域の断面積比

Au : 再組織変化が起こっていない領域の断面積比

Fr, Fu は E B R-II 照射データ解析から得られた。

Fr は次のとおりである。

[$B/F_1 < 30$ のとき]

$$Fr = F_7 + (1 - F_7) [1 - F_2 (1 - e^{-B/F_1}) F_1 / B]$$

[$Fr < F_7$ のとき]

$$Fr = F_7$$

[その他のとき]

$$Fr = 1.0$$

Fu は次のとおりである。

[$B > F_5$ のとき]

$$Fu = 1 - F_4 (1 - e^{-(B-F_3)/F_3}) \cdot e^{-F_8 q} \cdot F_3 / (B - F_3)$$

[$F_3 \leq B \leq F_5$ のとき]

$$Fu = 1 - F_4 (1 - e^{-(B-F_3)/F_3}) \cdot e^{-F_8 q} \cdot e^{F_6 (B-F_5)} \cdot F_3 / (B - F_3)$$

[$B < F_3$ のとき]

$$Fu = 0.0$$

[$Fu < 0.0$ のとき]

$$Fu = 0.0$$

B : 局所燃焼度 (MWd/t)

q : 局所線出力 (W/cm)

$F_1 \sim F_8$: 定数 (表 2.5-1 (3/4) の $fg_1 \sim fg_8$ を参照)

F I S G A S のフローチャートを図 2.5-5 に示す。

2.5.2 解析条件

ここでは、燃料挙動解析における軸方向計算モデル、運転履歴、燃料仕様および温度計算用出力分布等について示す。

1) 軸方向モデル

温度計算では、軸方向に炉心燃料部（55cm）を11ノードに均等に分割してモデル化した。軸方向モデルを図2.5-6に示す。インシュレータペレット部については、線出力が炉心部の数%であることから、本検討での燃料挙動解析モデル上は無視することとした。

2) 運転履歴および照射履歴

第0サイクルの運転実績は、「2.3 出力係数測定結果の概要」で示したように、段階的に出力上昇試験を実施している。本検討では、第0サイクルの運転履歴をできるだけ忠実にモデル化した。温度評価計算用にモデル化した運転履歴を表2.5-2～表2.5-10に示す。各ステップの出力上昇時間は1時間とし、出力保持時間を調整して各0～nサイクルの積算出力は保存した。

第27サイクル炉心は、新燃料集合体と旧燃料集合体の混在炉心である。第27サイクル炉心構成燃料集合体の照射履歴を表2.5-11に示す。炉内滞在期間が最も長い燃料集合体はPFD404であり、第19サイクルから滞在している。従って、表2.5-12に示す運転履歴をモデル化した。また、ほとんどの燃料集合体は、in-outのシャッフリングが行われているので、シャッフリングによる出力分布および中性子束分布等の照射履歴をできるだけ忠実にモデル化した。

3) 燃料仕様

燃料ペレット外径、被覆管内外径等の形状データ、Pu富化度、燃料密度等の燃料仕様については製造実績データを使用した。

4) 出力分布、高速中性子束分布、冷却材流量

最大線出力、軸方向出力分布、軸方向高速中性子束分布、冷却材流量等については、運転監視コード「MAGI」の計算結果を使用した。

5) 核分裂断面積

燃料挙動解析においてF P ガス生成量を求めるための核分裂断面積は、第0サイクル初期の炉心体系で計算した各列の平均値を使用した。燃料挙動解析で使用了1群核分裂断面積を表2.5-13に示す。

第0サイクル出力上昇試験時の炉心中心の炉心燃料集合体の燃料挙動解析の計算データを表2.5-14に示す。

2.5.3 解析結果

本検討では、第0サイクル出力上昇試験時においては、炉心燃料集合体64体および特殊燃料集合体2体について燃料挙動解析を行い、213ステップの各ステップの燃料温度、被覆管温度および冷却材温度を軸方向ノード毎に計算した。また、第27サイクルにおいても、炉心燃料集合体64体および特殊燃料集合体3体について、同様の燃料挙動解析を行い各ステップの燃料温度、被覆管温度および冷却材温度を軸方向ノード毎に計算した。解析結果を以下に示す。

1) 燃料再結晶生成ステップ

原子炉の出力上昇に伴い燃料は組織変化が起き、等軸晶領域、柱状晶領域および、センターボイド領域が段階的に生成され、組織変化の領域は拡大する。

第0サイクル出力上昇試験時の燃料挙動解析における再結晶生成ステップを表2.5-15に示す。炉心中心の炉心燃料集合体(0X PFD001)では、等軸晶領域は約65MW(60ステップ目)で最初に生成され、柱状晶領域およびセンターボイド領域は約75MW(63ステップ目)で最初に生成されている。出力が上昇すると再結晶領域は徐々に拡大する。炉心中心の炉心燃料集合体では再結晶領域がほぼ全体に拡大している。炉心中心の炉心燃料集合体の再結晶領域の生成拡大する過程を図2.5-7～図2.5-14に示す。径方向には再結晶領域(等軸晶領域)が生成されるのは3Xの炉心燃料集合体までである。また、柱状晶領域およびセンターボイド領域が生成されるのは2Xの炉心燃料集合体までである。

一方、第27サイクルでは、表2.5-11から分かるように、炉心燃料集合体のほとんどがin-outのシャッフリングを行っている。新燃料集合体の装荷方法として、まず炉心中心近傍(0X或いは1X)に装荷され、その後、炉心の外側にシャッフリングされている。従って、新燃料集合体以外は、ほとんどの燃料集合体が第27サイクル以前に燃料再結晶が

生成されている。このことから、第27サイクルは燃料再結晶生成の燃料集合体が炉心全体に拡大していることが特徴といえる。

第27サイクルにおける新燃料集合体はわずかに4体であり、0Xおよび1Xの炉心中心近傍に装荷されている。この4体の燃料再結晶の生成および拡大状態と炉出力の関係は、第0サイクルで示した図と同様の経過をたどる。

2) 燃料温度

炉心中心の炉心燃料集合体において、燃料の再結晶領域が生成された第0～6サイクル出力上昇試験時の軸方向中心ノードの燃料平均温度および燃料中心温度を図2.5-15に示す。燃料にセンターボイド領域が生成された約75MW以降で燃料温度の上昇勾配が若干小さくなっていることが分かる。また、第0～7サイクルの出力上昇試験における出力上昇時(1)および出力下降時の軸方向中心ノードの燃料平均温度および燃料中心温度を径方向列毎に図2.5-16～図2.5-27に示す。第0～7サイクルについては、前サイクルで燃料の再結晶が起こっているために、燃料温度に大きな変化は見られない。

第27サイクルの初期における出力上昇時および末期における出力下降時の軸方向中心ノードの燃料平均温度および燃料中心温度を径方向列毎に図2.5-28～図2.5-39に示す。新燃料集合体以外は、燃料温度に大きな変化は見られない。

全体的な傾向として、燃料の再結晶が起こりセンターボイド領域が生成された時点で燃料温度が変化していることが分かる。

第0サイクルにおいては、図2.5-15に示す0Xの炉心燃料集合体の75MW近傍、図2.5-16および図2.5-17に示す0Xおよび1Xの80MW近傍、図2.5-18に示す2Xの90MW近傍で温度変化が見られ、温度上昇勾配が若干小さくなっていることが分かる。これは、センターボイドの生成および

拡大によるものである。一般的に、燃料の温度が上昇すると燃料の熱伝導度は悪くなるが、等軸晶領域および柱状晶領域が生成されると燃料の密度は密になり燃料の熱伝導度は良くなる傾向にある。両方の差引でセンターボイドが生成されるまでは温度変化がほとんどないと推定される。

一方、第27サイクルでは、前記したように、新燃料集合体4体以外の炉心燃料集合体はほとんどがin-outのシャッフリングを行っている。従って、新燃料集合体以外は、ほとんどの燃料集合体が第27サイクル以前に燃料再結晶が生成されているために、出力変化にともなう温度上昇には目立った変化は見られない。ただし、図2.5-28に示すように、新燃料集合体については、燃料の再結晶領域生成による急激な燃料温度の変化が見られる。

表2.5-1 物性値及び物性定数 (1/4)

Fortran 記号	物理的 記号	物性値及び 物性定数	物理的意味
CP	C_{PN}	1.263	冷却材比熱(J/g°C)
ALPHA0	α_o^c	1.416×10^{-5}	被覆管熱膨張係数： α^c (1/°C)
ALPHAS	α_s^c	6.342×10^{-9}	$\alpha^c = \alpha_o^c + \alpha_s^c \cdot T$
CK1	k_1^c	0.13283	被覆管熱伝導率： k^c (W/cm°C)
CK2	k_2^c	1.3×10^{-4}	$k^c = k_1^c + k_2^c \cdot T$
YMOD0	E_o^c	2.0793×10^6	被覆管ヤング率： E^c (kg/cmf)
YMODS	E_s^c	-8.86×10^2	$E^c = E_o^c + E_s^c \cdot T$
PNU	ν^c	0.32	被覆管ポアソン比
YEO	Y_o^c	4.82×10^9	被覆管降伏点 (dyn/cm ²)
YES	Y_s^c	-1.078×10^7	$Y^c = Y_o^c + Y_s^c \cdot T$
EMC	ε_c	0.90	被覆管輻射率
FALFO	α_o^f	0.6578×10^{-5}	燃料ペレット熱膨張係数： α^f (1/°C)
FALFT	α_T^f	2.997×10^{-9}	$\alpha^f = \alpha_o^f + \alpha_T^f \cdot T$
FKD	k_D^f	1.133	燃料ペレット熱伝導率： k^f (W/cm°C)
FK1	k_1^f	0.78	$k^f = k_D^f [1 / (k_1^f + k_2^f \cdot T) + k_3^f \cdot T^3]$
FK2	k_2^f	0.02935	
FK3	k_3^f	6.6×10^{-13}	
YMODFO	E_o^f	2.5×10^{12}	燃料ペレットヤング率： E^f (dyn/cm ²)
YMODFS	E_s^f	-4.455×10^8	$E^f = E_o^f + E_s^f \cdot T$
EMF	ε_f	0.80	燃料ペレット輻射率

表2.5-1 物性値及び物性定数 (2/4)

Fortran 記号	物理的 記号	物性値及び 物性定数	物理的意味
A(1,1)	A_1^G	1.3084×10^{-3}	Fission Gas 各成分の熱伝導率 (1/°C) $k_i^G = A_i^G + B_i^G \cdot T + C_i^G \cdot T^2$
A(2,1)	A_2^G	5.7392×10^{-6}	
A(3,1)	A_3^G	9.5598×10^{-6}	
A(4,1)	A_4^G	2.570×10^{-4}	
A(5,1)	A_5^G	1.716×10^{-4}	
A(1,2)	B_1^G	3.6961×10^{-6}	$A(i, j)$ i=1 Heガス i=2 Nガス i=3 Arガス i=4 Xeガス i=5 Krガス
A(2,2)	B_2^G	1.4509×10^{-7}	
A(3,2)	B_3^G	2.1357×10^{-7}	
A(4,2)	B_4^G	5.651×10^{-7}	
A(5,2)	B_5^G	4.122×10^{-7}	
A(1,3)	C_1^G	-5.848×10^{-10}	j=1 A j=2 B j=3 C
A(2,3)	C_2^G	-2.3229×10^{-11}	
A(3,3)	C_3^G	-3.5057×10^{-11}	
A(4,3)	C_4^G	-7.336×10^{-11}	
A(5,3)	C_5^G	-8.015×10^{-11}	
RG1	G_1	3.8782×10^{-6}	Gap幅 Correlation Model [CrackingによるGap Closure] $O1 = G_1 P_j (P_j - G_2) (e^{G_3 Y_o} - e^{G_3 Y})$ [Transient SwellingによるGap Closure] $O4 = G_4 (e^{G_5 P_j B_o} - e^{G_5 P_j B})$ $+ \{ G_6 - [G_1 P_j (P_j - G_2)] \}$ $(e^{-G_7 B_o} - e^{-G_7 B})$
RG2	G_2	126.0	
RG3	G_3	-0.522	
RG4	G_4	0.395	
RG5	G_5	-0.01684	
RG6	G_6	0.600	
RG7	G_7	0.11×10^{-4}	
HG1	hg_1	1.1095×10^{-3}	Gap熱伝達係数 Correlation [ペレット、クラッド表面粗さ] $EP S = hg_1 hg_x + (g_f + g_c)$ $hg_x = e^{hg_2 P_{gap}}$ $hg_{xx} = e^{-EFPD hg_4}$ $hg_{xx} < hg_x$ のとき $hg_x = hg_{xx}$ [S - S Gap Conductance] $HS = Hg_3 K_s (P_{gap} - P_{RMX}) / Y$
HG2	hg_2	-0.3394×10^{-9}	
HG3	hg_3	13.7	
HG4	hg_4	3.0×10^{-3}	

表2.5-1 物性値及び物性定数 (3/4)

Fortran 記号	物理的 記号	物性値及び 物性定数	物理的意味
FR1	$F r_1$	1886.0	Fuel Restructuringに使用する係数
FR2	$F r_2$	0.4895	$T_{\infty,1} = F r_1 - F r_2 W$
FR3	$F r_3$	1570.0	$T_{\infty,q} = F r_3$
FG1	$f g_1$	5890.0	Fission Gas生成 Correlation係数
FG2	$f g_2$	0.86498	$B U D E P = B_j / f g_1$
FG3	$f g_3$	3515.0	if(BUDEP<30)
FG4	$f g_4$	7.3451	$\phi 2 = f g_7 + (1 - f g_7) [1 - (1 - e^{-BUDEP})$
FG5	$f g_5$	4917.0	$(f g_2 / BUDEP)]$
FG6	$f g_6$	-0.0002883	if($\phi 2 < f g_7$): $\phi 2 = f g_7$
FG7	$f g_7$	0.0824	$\phi 1 = \phi 2$
FG8	$f g_8$	0.001246	$B U D E P = (B_j - f g_3) / f g_3$
			$\phi 3 = 1 - [(1 - e^{-BUDEP}) f g_4 e^{-f g_8 P_j}$
			$(1 / BUDEP)]$
			$Z Z = f g_6 (B_j - f g_5)$
			if($Z Z \leq 0.0$): $\phi 3 = \phi 3 e^{ZZ}$
			if($B_j < f g_3$): $\phi 3 = 0.0$
			if($\phi 3 < 0.0$): $\phi 3 = 0.0$
			$\phi 1$; COLの単位体積当たりのFission Gas放出量
			$\phi 2$; EQAの "
			$\phi 3$; UR の "
FYU5X	$F Y_{U5X}$	0.21749	Xe(U235) Fission Gas生成 Correlation係数
FYU5K	$F Y_{U5K}$	0.0482	Kr(U235) U235, U238, PuのXe, Kr, Total
FYU5	$F Y_{U5}$	0.26569	Total(U235) Fission gas生成割合
FYU8X	$F Y_{U8X}$	0.2135	Xe(U238)
FYU8K	$F Y_{U8K}$	0.03085	Kr(U238) [fission gas生成体積の計算]
FYU8	$F Y_{U8}$	0.24435	Total(U238) $Vfg = \text{Fission}(F_{U235} F Y_{U5}$
FYPUX	$F Y_{PUX}$	0.23314	Xe(Pu) $+ F_{U238} F Y_{U8}$
FYPUK	$F Y_{PUK}$	0.0238	Kr(Pu) $+ F_{Pu} F Y_{Pu}$
FYPU	$F Y_{Pu}$	0.25694	Total(Pu)

表2.5-1 物性値及び物性定数 (4/4)

Fortran 記号	物理的 記号	物性値及び 物性定数	物理的意味
EU235	E_{DU5}	203.0	U235の1fission当たりの放出エネルギー
EU238	E_{DU8}	201.0	U238の "
EPu	E_{DPu}	211.0	Puの "
ELGAMA	$ELOS_j$	9.2	γ -損失による燃料ピンからのエネルギー損失
A1	A_1	0.8121	Accomodation
A2	A_2	4.5167	$a = A_1 e^{[-(\ln W - A_2)^2 / A_3]}$
A3	A_3	7.7139	

表 2.5-2 温度評価用第 0 - 1 サイクルの運転履歴

測定データ 番号	計算ステップ 番号	原子炉熱出力 (MW)	出力保持時間 (h)
1	1	2.12	1.0
2	2	10.88	1.0
3	3	14.93	1.0
4	4	19.21	1.0
5	5	23.31	1.0
	6	25.00	93.95

表 2.5-3 温度評価用第 0 - 2 サイクルの運転履歴

測定データ 番号	計算ステップ 番号	原子炉熱出力 (MW)	出力保持時間 (h)
6	7	3.21	1.0
7	8	11.79	1.0
8	9	16.40	1.0
9	10	20.60	1.0
10	11	25.03	1.0
	12	25.00	43.47

表 2.5-4 温度評価用第 0 - 3 サイクルの運転履歴

測定データ 番号	計算ステップ 番号	原子炉熱出力 (MW)	出力保持時間 (h)
11	13	6.09	1.0
12	14	11.45	1.0
13	15	15.57	1.0
14	16	20.74	1.0
15	17	25.27	1.0
16	18	29.28	1.0
17	19	33.76	1.0
18	20	37.90	1.0
19	21	44.93	1.0
20	22	49.73	1.0

表 2.5-5 温度評価用第 0 - 4 サイクルの運転履歴

測定データ 番号	計算ステップ 番号	原子炉熱出力 (MW)	出力保持時間 (h)
21	23	2.40	1.0
22	24	21.39	1.0
23	25	29.88	1.0
24	26	39.28	1.0
25	27	49.55	1.0
26	28	49.05	18.63
27	29	43.85	1.0
28	30	40.02	1.0
29	31	44.24	1.0
30	32	49.26	1.0
	33	50.0	50.49

表 2.5-6 温度評価用第 0 - 5 サイクルの運転履歴

測定データ 番号	計算ステップ 番号	原子炉熱出力 (MW)	出力保持時間 (h)
31	34	5.40	1.0
32	35	10.80	1.0
33	36	15.33	1.0
34	37	19.75	1.0
35	38	24.99	1.0
36	39	30.32	1.0
37	40	35.25	1.0
38	41	40.38	1.0
39	42	44.83	1.0
40	43	50.08	1.0
	44	50.0	72.27

表 2.5-7 温度評価用第 0 - 6 サイクルの運転履歴

測定データ 番号	計算ステップ 番号	原子炉熱出力 (MW)	出力保持時間 (h)
41	45	2.46	1.0
42	46	11.28	1.0
43	47	16.53	1.0
44	48	20.04	1.0
45	49	25.70	1.0
46	50	29.99	1.0
47	51	35.43	1.0
48	52	39.94	1.0
49	53	44.39	1.0
50	54	50.50	1.0
	55	50.0	12.79
51	56	49.01	1.0
52	57	54.93	1.0
53	58	59.96	1.0
54	59	64.57	1.0
55	60	68.95	1.0
56	61	74.54	1.0
	62	75.0	17.29
57	63	77.07	1.0
58	64	68.68	1.0
	65	70.0	6.43
59	66	69.22	1.0
60	67	74.00	1.0
	68	75.0	97.68
61	69	73.26	1.0
62	70	76.97	1.0
63	71	81.19	1.0
	72	80.0	11.15
64	73	80.40	1.0
65	74	84.92	1.0
	75	85.0	1.00

表 2.5-8 温度評価用第 0 - 7 サイクルの運転履歴 (1/2)

測定データ 番号	計算ステップ 番号	原子炉熱出力 (MW)	出力保持時間 (h)
66	76	3.87	1.0
67	77	12.06	1.0
68	78	16.45	1.0
69	79	20.38	1.0
70	80	25.85	1.0
71	81	30.35	1.0
72	82	35.46	1.0
73	83	40.10	1.0
74	84	44.93	1.0
75	85	49.46	1.0
76	86	54.61	1.0
77	87	59.63	1.0
78	88	63.97	1.0
79	89	69.06	1.0
80	90	73.66	1.0
81	91	78.62	1.0
82	92	83.58	1.0
83	93	88.02	1.0
	94	88.0	6.30
84	95	87.93	1.0
85	96	93.66	1.0
	97	94.0	11.28
86	98	93.68	1.0
87	99	97.20	1.0
	100	97.0	18.84
88	101	96.33	1.0
89	102	98.25	1.0
	103	98.0	21.14
90	104	97.73	1.0
91	105	93.11	1.0
92	106	88.12	1.0
93	107	83.35	1.0
94	108	78.52	1.0
95	109	72.98	1.0
96	110	68.90	1.0
97	111	63.51	1.0
98	112	58.21	1.0
99	113	52.56	1.0
100	114	48.48	1.0
101	115	44.75	1.0
102	116	39.92	1.0
103	117	34.26	1.0
104	118	29.26	1.0
	119	29.0	8.23

表 2.5-8 温度評価用第 0 - 7 サイクルの運転履歴 (2/2)

測定データ 番号	計算ステップ 番号	原子炉熱出力 (MW)	出力保持時間 (h)
105	120	28.70	1.0
106	121	22.28	1.0
107	122	19.00	1.0
108	123	14.03	1.0
109	124	13.41	1.0
110	125	19.18	1.0
111	126	25.82	1.0
112	127	30.38	1.0
	128	30.0	15.74
113	129	31.63	1.0
114	130	35.12	1.0
115	131	40.34	1.0
116	132	45.08	1.0
117	133	49.66	1.0
118	134	55.73	1.0
119	135	61.09	1.0
120	136	69.10	1.0
121	137	73.63	1.0
122	138	78.88	1.0
123	139	84.45	1.0
124	140	89.15	1.0
125	141	93.78	1.0
126	142	99.46	1.0
	143	100.0	54.27

表 2.5-9 温度評価用第 0 - 8 サイクルの運転履歴

測定データ 番号	計算ステップ 番号	原子炉熱出力 (MW)	出力保持時間 (h)
127	144	3.83	1.0
128	145	11.70	1.0
129	146	16.47	1.0
130	147	20.48	1.0
131	148	25.33	1.0
132	149	31.33	1.0
133	150	35.41	1.0
134	151	40.16	1.0
135	152	44.81	1.0
136	153	49.86	1.0
	154	50.0	12.00
137	155	49.50	1.0
138	156	54.52	1.0
139	157	59.01	1.0
140	158	59.52	1.0
141	159	63.17	1.0
142	160	68.15	1.0
143	161	73.94	1.0
	162	74.0	41.16
144	163	73.29	1.0
145	164	78.94	1.0
146	165	84.43	1.0
147	166	89.47	1.0
148	167	94.61	1.0
149	168	98.71	1.0
	169	100.0	24.00

表 2.5-10 温度評価用第 0 - 9 サイクルの運転履歴

測定データ 番号	計算ステップ 番号	原子炉熱出力 (MW)	出力保持時間 (h)
150	170	2.65	1.0
151	171	5.63	1.0
152	172	10.46	1.0
153	173	16.86	1.0
154	174	21.54	1.0
155	175	26.18	1.0
156	176	30.54	1.0
157	177	35.87	1.0
158	178	42.67	1.0
159	179	46.42	1.0
160	180	51.30	1.0
	181	50.0	8.86
161	182	53.96	1.0
162	183	60.97	1.0
163	184	66.05	1.0
164	185	70.77	1.0
165	186	76.00	1.0
166	187	79.82	1.0
167	188	84.35	1.0
168	189	89.44	1.0
169	190	94.42	1.0
170	191	99.15	1.0
	192	100.0	64.44
171	193	98.51	1.0
172	194	93.80	1.0
173	195	89.13	1.0
174	196	84.62	1.0
175	197	78.88	1.0
176	198	74.49	1.0
177	199	68.14	1.0
178	200	63.43	1.0
179	201	58.73	1.0
180	202	52.25	1.0
181	203	48.50	1.0
	204	50.0	6.73
182	205	49.30	1.0
183	206	42.37	1.0
184	207	39.17	1.0
185	208	34.71	1.0
186	209	29.75	1.0
187	210	24.15	1.0
188	211	19.74	1.0
189	212	15.56	1.0
190	213	11.06	1.0

表2.5-11 27サイクル炉心構成燃料集合体の照射履歴

集合体名	19	20	20'	21	22	23	23''	24	24'	25	25'	26	27
PFD240			000	4D2	4D2	4D2	4D2	4D2	4D2	4D2	4D2	4D2	4D2
PFD244			R21	3A1	3A1	3A1	3A1	3A1	3A1	5E3	5E3	5E3	5E3
PFD245		3C1	3C1	3C1	5B3	5B3	5B3	5B3	5B3	5B3	5B3	5B3	5B3
PFD247			R06	3E1	3E1	4A2	4A2	4A2	4A2	4A2	4A2	4A2	4A2
PFD248										3A1	3A1	3A1	3A1
PFD249										5F3	5F3	5F3	5F3
PFD250													2E1
PFD404	2F1	2F1	2F1	2F1	5B4	5B4	5B4	5B4	5B4	5B4	5B4	5B4	5B4
PFD409		1E1	1E1	1E1	4C2	4C2	4C2	4C2	4C2	4C2	4C2	4C2	4C2
PFD410					1D1	1D1	1D1	1D1	1D1	4F4	4F4	4F4	4F4
PFD411		2B2	2B2	2B2	3C1	4A4	4A4	4A4	4A4	4A4	4A4	4A4	4A4
PFD412		1D1	1D1	1D1	4E3	4E3	4E3	4E3	4E3	4E3	4E3	4E3	4E3
PFD413				1B1	3A2	3A2	3A2	3A2	3A2	5A3	5A3	5A3	5A3
PFD414				2C2	2C2	5C3	2E1	5C2	5C2	5C2	5C2	5C2	5C2
PFD415		2A2	2A2	2A2	4C3	4C3	4C3	4C3	4C3	4C3	4C3	4C3	4C3
PFD416				1F1	1F1	4C4	3C2	3E1	3E1	3E1	3E1	5F4	5F4
PFD501						000	1A1	2D1	2D1	2D1	2D1	3D2	4F1
PFD502						1F1	1F1	1F1	1F1	4A1	4A1	4A1	4A1
PFD503						2C1	2C1	2C1	2C1	2C1	2C1	2C1	4B1
PFD504						2C2	2C2	2C2	2C2	2C2	2C2	3B2	3B2
PFD505										3A2	3A2	3A2	3A2
PFD507						2E1	000	000	1A1	4A3	4A3	4A3	4A3
PFD508						3D1	3D1	3D1	3D1	3D1	3D1	3D1	3D1
PFD509						3B1	3B1	3B1	3B1	3B1	3B1	3B1	3B1
PFD510						3C1	3C1	3C1	3C1	3C1	3C1	3C1	3C1
PFD511						2E2	2E2	2E2	2E2	2E2	2E2	3E1	4E1
PFD512								2D2	2D2	2D2	2D2	2D2	2D2
PFD513								1C1	1C1	1C1	1C1	2E1	3F1
PFD514								1B1	1B1	1B1	1B1	2C2	2C2
PFD515								2A1	2A1	2A1	2A1	2A1	2A1
PFD516								1E1	1E1	1E1	1E1	2D1	3E1
PFD517								2E1	2E1	2E1	2E1	2E1	3D2
PFD518											R18	1B1	1B1
PFD519									R21	2A2	2A2	2A2	2A2
PFD520									R22	2B1	2B1	2B1	2B1
PFD521									R06	2B2	2B2	2B2	2B2
PFD522											R07	1C1	2E2
PFD523										000	1A1	000	2C1
PFD524									R07	1D1	1D1	1D1	2D1
PFD525									R17	1F1	1F1	2F2	2F2
PFD526				1C1	3F1	3F1	3F1	3F1	3F1	3F1	3F1	5D4	5D4
PFD527				000	000	4E4	3F2	3F2	3F2	5D3	5D3	5D3	5D3
PFD528											R19	1E1	1E1
PFD529											R02	1F1	1D1
PFD530											R21	2F1	2F1
PFD531											R22	3E2	3E2
PFD532					3B2	3B2	3B2	3B2	3B2	3B2	3B2	4F3	4F3
PFD533													000
PFD534				3D2	3D2	3D2	3D2	3D2	3D2	3D2	3D2	4B2	4B2
PFD535				2C1	2C1	4E2	4E2	4E2	4E2	4E2	4E2	4E2	4E2
PFD536				2D1	2D1	2D1	2D1	R04	R04	4D3	4D3	4D3	4D3
PFD537													1C1
PFD538				2E1	2E1	5D2	R03	R03	R03	5C3	5C3	5C3	5C3
PFD539					2B2	2B2	2B2	2B2	2B2	4C1	4C1	4C1	4C1
PFD540													1F1
PFD541				2F2	3E2	3E2	3E2	3E2	3E2	3E2	3E2	5E4	5E4
PFD542					2F2	2F2	2F2	2F2	2F2	2F2	2F2	4D4	4D4
PFD544					1B1	1B1	1B1	4B4	4B4	4B4	4B4	4B4	4B4
PFD545					2A2	2A2	2A2	2A2	2A2	4F2	3F2	4B3	4B3
PFD546					1E1	1E1	1E1	5D4	5D4	4F2	4F2	4F2	4F2
PFD547					2A1	2A1	2A1	4E4	4E4	4E4	4E4	4E4	4E4
PFD548					2F1	2F1	2F1	2F1	2F1	2F1	2F1	3F1	5A4
PFD549					2B1	2B1	2B1	2B1	2B1	4D1	4D1	4D1	4D1
PFD550					1C1	1C1	1C1	4C4	4C4	4C4	4C4	4C4	4C4

表2.5-12 第19～27サイクルの運転履歴

サイクル	運転日数 (EFPD)
19	68.698
20	39.989
20'	3.701
21	68.837
22	68.710
23	52.845
23'	0.241
23''	0.005
23'''	7.199
24	41.522
24'	0.166
25	68.849
25'	3.328
26	39.513
27	30.085

表2.5-13 1群化した核分裂断面積

	核分裂断面積 (barns)		
	U-235	U-238	Pu
0X	1.683	0.0701	1.776
1X	1.679	0.0704	1.774
2X	1.677	0.0707	1.774
3X	1.690	0.0705	1.783
4X	1.749	0.0695	1.814
5X	1.998	0.0708	1.967

表2.5-14 燃料挙動解析コード” S I E X” の入力データ例 -000(pfd001)- (1/2)

----- siex analysis -----
input parameters used for this analysis

description	name	value	
active fuel column length	flen	5.5000E+01	cm
extrapolation distance	e	-1.1000E+01	cm
fuel diameter	fd	4.6300E-01	cm
fuel central annulus diameter	void	0.0000E+00	cm
pin diameter	dp	5.5000E-01	cm
cladding thickness	ct	3.5000E-02	cm
peak linear power	pm	3.4057E+02	w/cm
coolant mass flow rate	cmf	7.0250E+01	g/sec
coolant specific heat	cp	1.2630E+00	j/ g-deg c
film coefficient	hf	1.5000E+01	w/cm**2-deg c
gap coefficient	hg	5.6770E-01	w/cm**2-deg c
cladding conductivity	ck	0.0000E+00	w/cm-deg c
inlet coolant temperature	ti	3.7000E+02	deg c
temp. at columnar (sintering) boundary	tb	0.0000E+00	deg c
temp. at equiaxed grain boundary	temp2	0.0000E+00	deg c
fraction of theoretical density-unsintrd	denlo	9.3700E-01	
fraction of theoretical density-sintered	denhi	9.9000E-01	
fuel theoretical density	td	1.1020E+01	gm/cc
fraction of fuel volume occupied by dish	dish	0.0000E+00	
fraction of metal which is pu239 + pu241	pu	2.2520E-01	
fraction of metal which is uranium 235	u235	8.6400E-02	
number of axial segments	segnum	1.1000E+01	
peak burn up	pbu	0.0000E+00	mwd/mtm
operating time-effective full power days	efpd	2.3029E+01	days
number of calculations/printouts	steps	-2.1300E+02	
fission gas release - columnar zone	z1	1.0000E+00	fraction
fission gas release - equiaxed zone	z2	1.0000E+00	fraction
fission gas release - unrestructured zone	z3	-1.0000E+00	fraction
sorbed gas per gram of fuel	ccpgm	4.4600E-06	mol/gm
fraction of sorbed gas which is nitrogen	fn	2.1700E-02	
parts per million water vapor	ppm	1.0000E+01	
effective plenum length	epl	4.9740E+01	cm
percent of xenon in the fill gas	xefil	0.0000E+00	
percent of krypton in the fill gas	krfil	0.0000E+00	
coef linear expansion - intercept	alphao	1.4160E-05	cm/cm-deg c
coef linear expansion - slope	alphas	6.3420E-09	cm/cm-(deg c)**2
youngs modulus - intercept	ymodo	2.0793E+06	kg/cm**2
youngs modulus - slope	ymods	-8.8600E+02	kg/cm**2-deg c
poissons ratio	pnu	3.2000E-01	
peak flux (energy > .1 mev)	pflux	3.1190E+15	neut/cm**2-sec
material(1=annealed type 304 ss 2=annealed type 316 ss 3=20x cw type 316 ss)	tmswc	3.0000E+00	
external pressure	externp	2.5100E+00	kg/cm**2
fission gas release/plenum press. option	itab1	1.0000E+00	1=calc 0=bypass
pin delta d/d option	itab2	1.0000E+00	1=calc 0=bypass
hot gap coefficient option	itab3	1.0000E+00	1=calc 0=hg from above is used
elastic stress option	itab4	1.0000E+00	1=calc 0=bypass

表2.5-14 燃料挙動解析コード” S I E X” の入力データ例 -000(pfd001)- (2/2)

--- axial flux, and power distributions used for this analysis ---

axial position (relative)	neutron flux(>0.1MeV) (relative)	linear heat ratio (relative)
0.045	0.606	0.689
0.136	0.756	0.796
0.227	0.871	0.887
0.318	0.950	0.958
0.409	0.993	0.996
0.500	1.000	1.000
0.591	0.970	0.970
0.682	0.906	0.907
0.773	0.811	0.814
0.864	0.687	0.703
0.955	0.541	0.578

表 2.5-15 第0サイクルにおける等軸晶領域、柱状晶領域及びセンターボイド領域の生成ステップ

ノード 番号	0x (000) pfd001	1x (1b1) pfd003	2x (2b1) pfd010	3x (3b1) pfd022	4x (4b1) pfd036	5x (5b3) pfd057
1	99- -	99- -	- -	- -	- -	- -
2	74- 99- 99	93-102-102	99- -	- -	- -	- -
3	63- 93- 93	71- 96- 96	93-142-142	142- -	- -	- -
4	61- 74- 74	61- 74- 74	74- 96- 96	96- -	- -	- -
5	60- 63- 63	61- 71- 71	63- 96- 96	96- -	- -	- -
6	60- 63- 63	60- 71- 71	63- 96- 96	94- -	- -	- -
7	60- 71- 71	61- 71- 71	63- 96- 96	96- -	- -	- -
8	61- 74- 74	61- 74- 74	74- 96- 96	96- -	- -	- -
9	63- 93- 93	71- 96- 96	96- -	- -	- -	- -
10	74- 99- 99	93-142-142	103- -	- -	- -	- -
11	99- -	142- -	- -	- -	- -	- -

aa-bb-cc

aa; 等軸晶領域の生成ステップ

bb; 柱状晶領域の生成ステップ

cc; センターボイド領域の生成ステップ

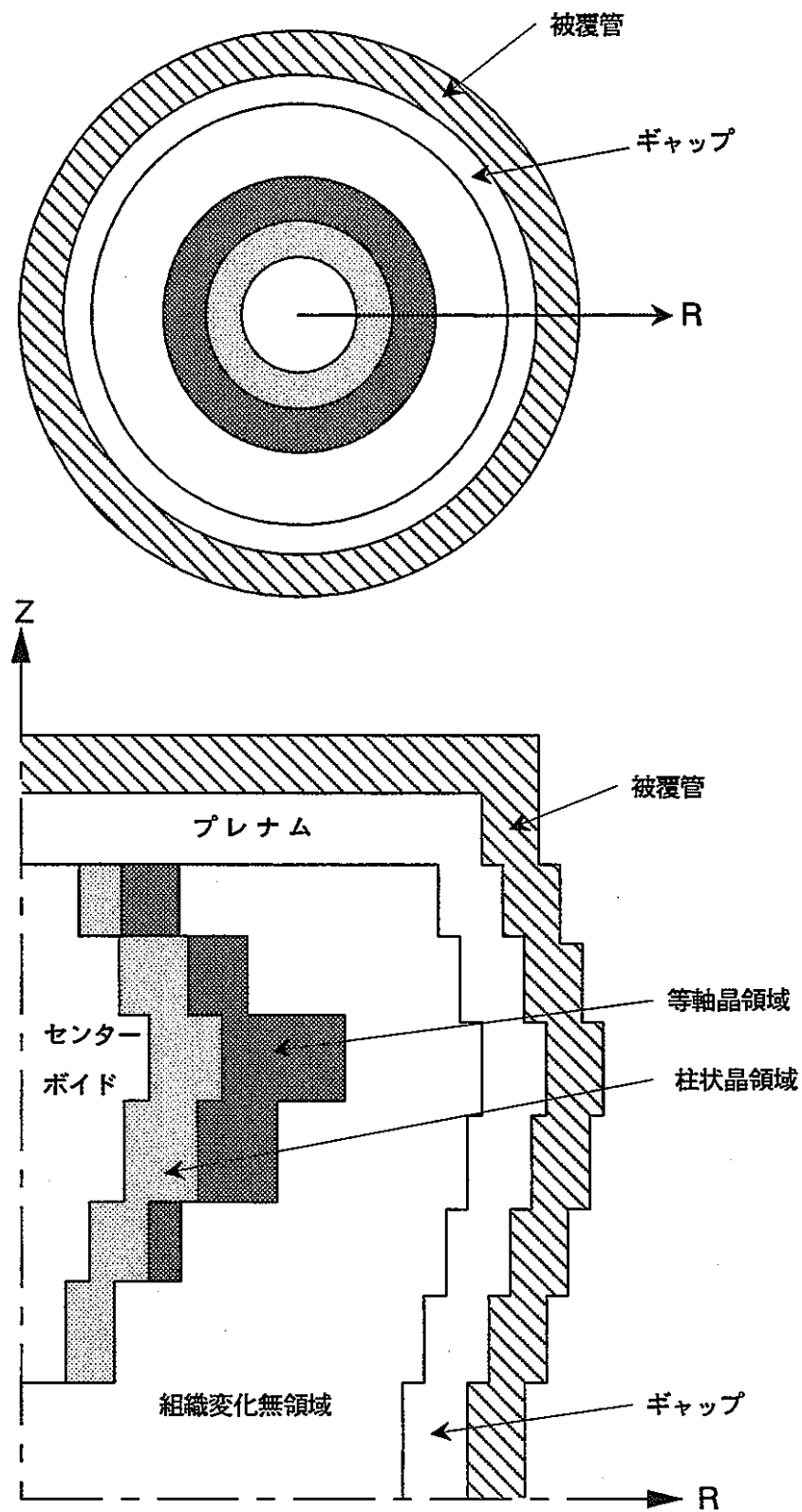


図2.5-1 SIEXコードの燃料ピンモデル

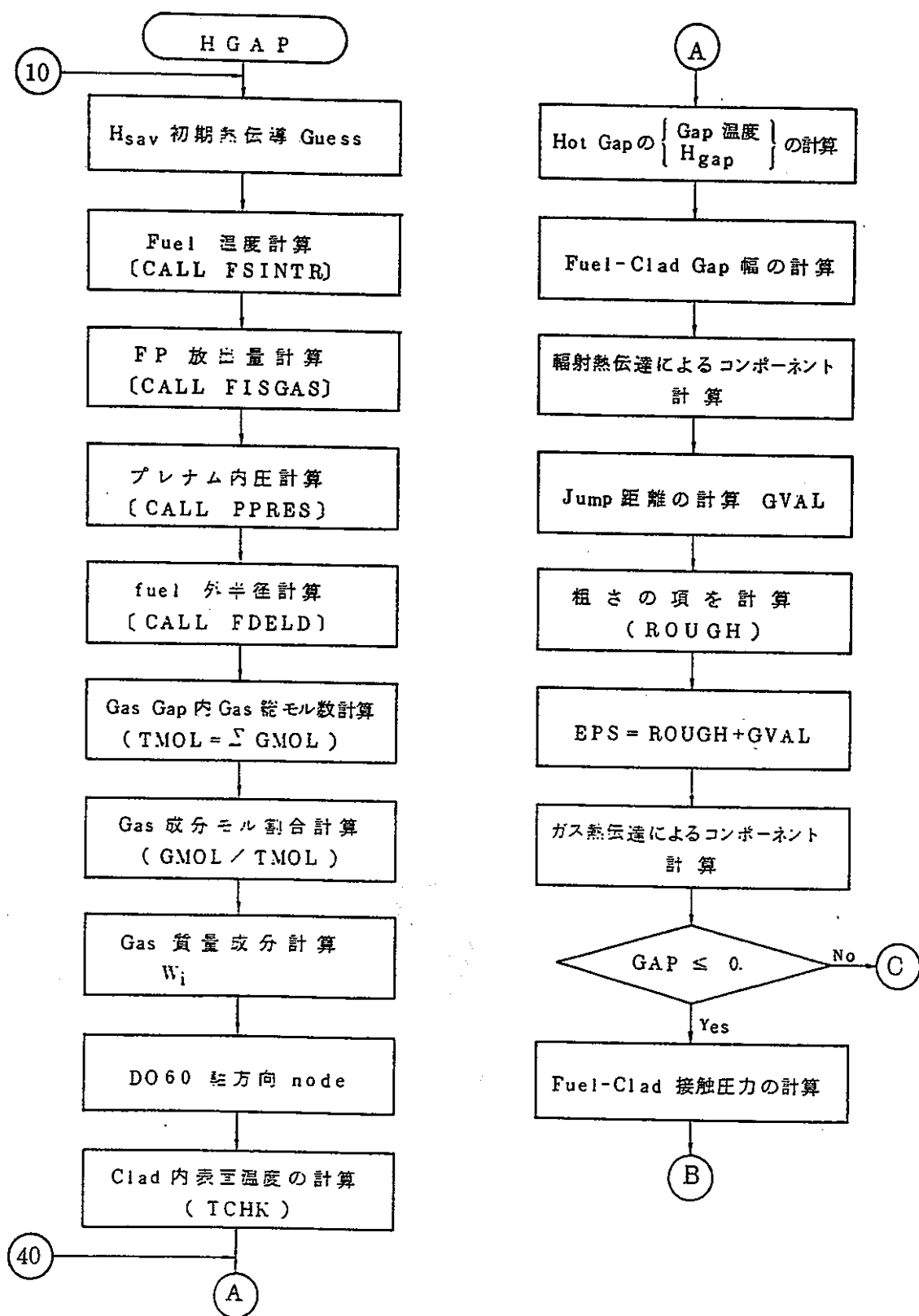


図2.5-2 HGAPのフローチャート (1/2)

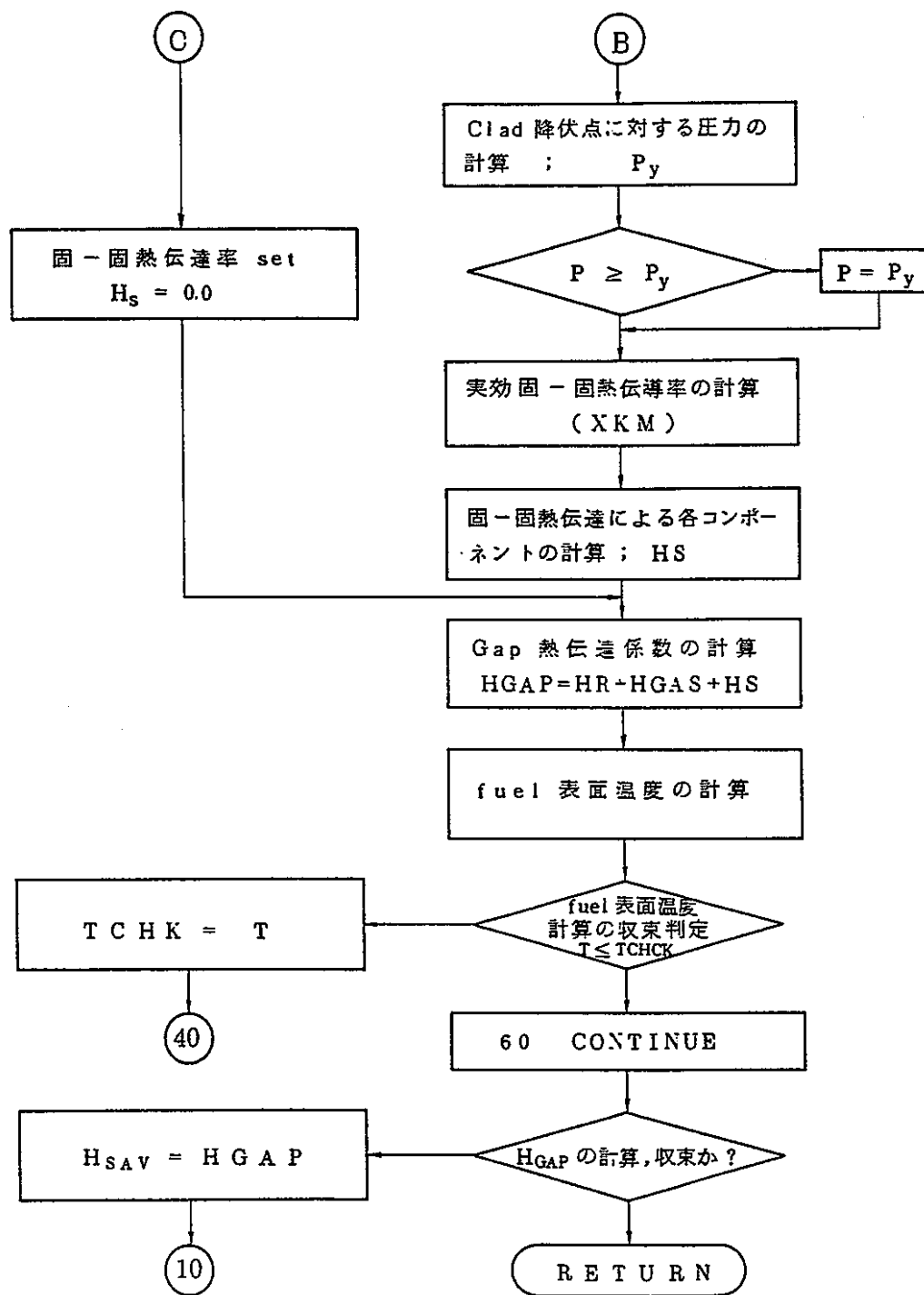


図2.5-2 HGAPのフローチャート (2/2)

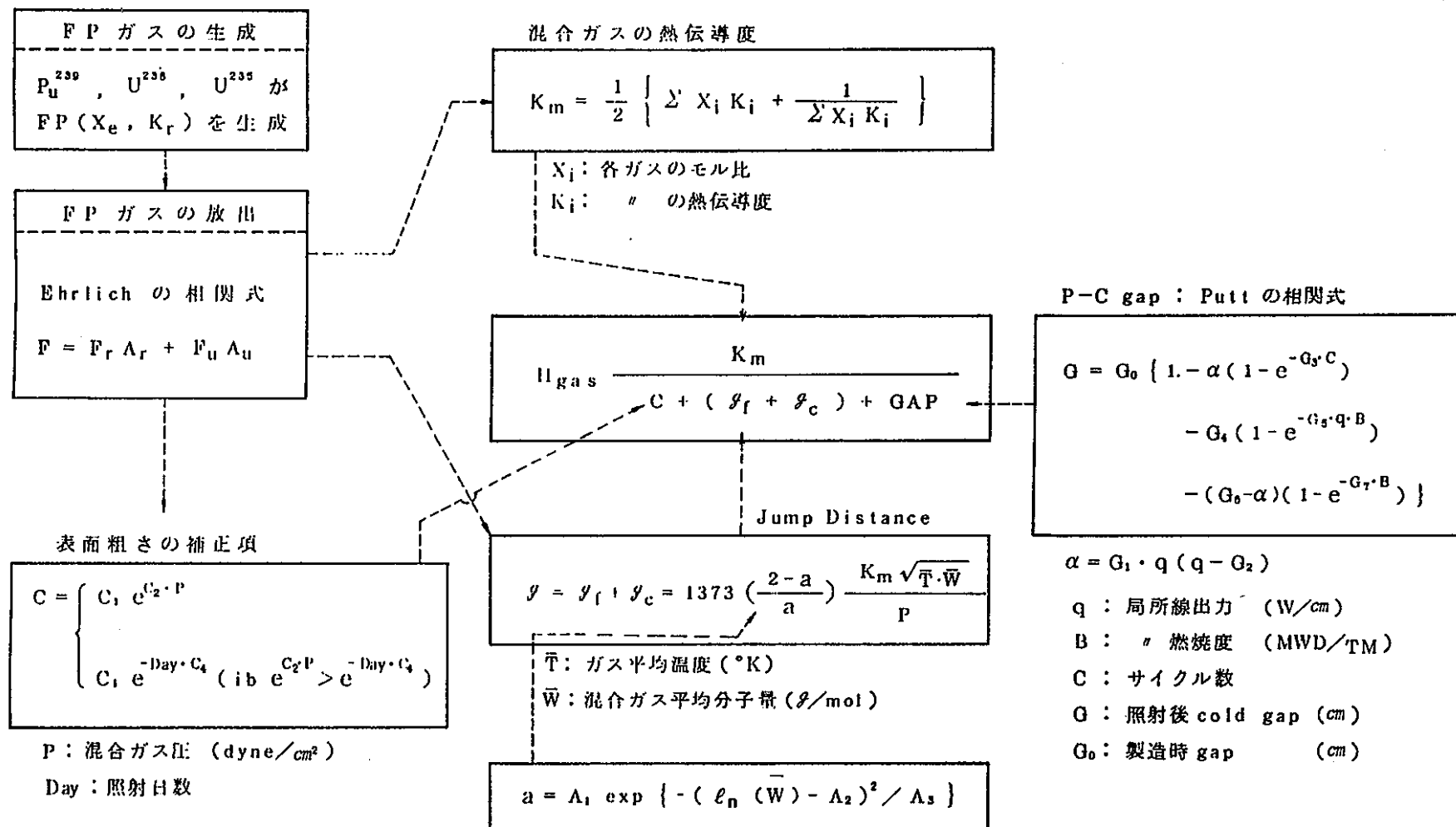


図2.5-3 ギャップコンダクタンスと種々の原因の相互関係

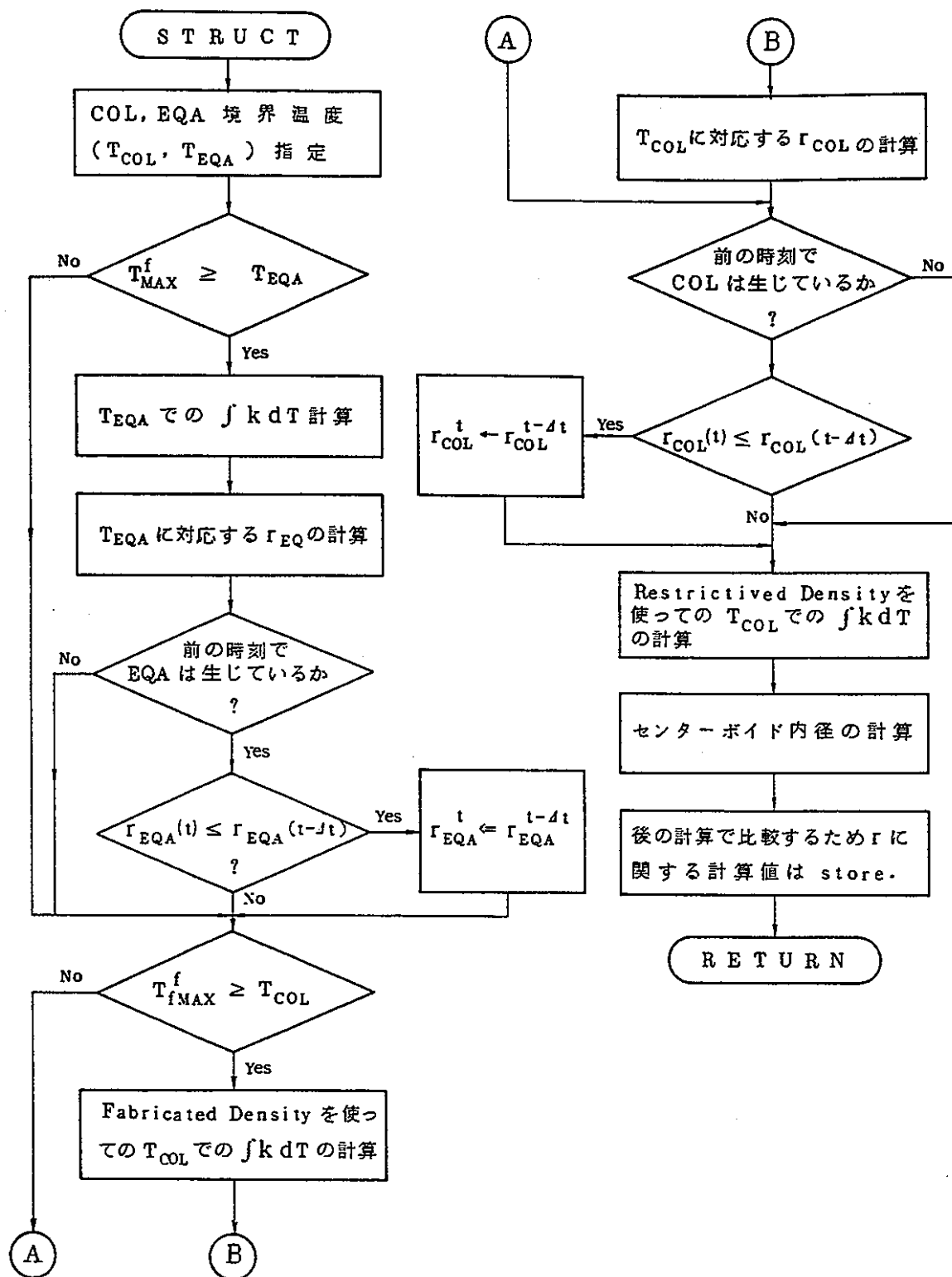


図2.5-4 STRUCTのフローチャート

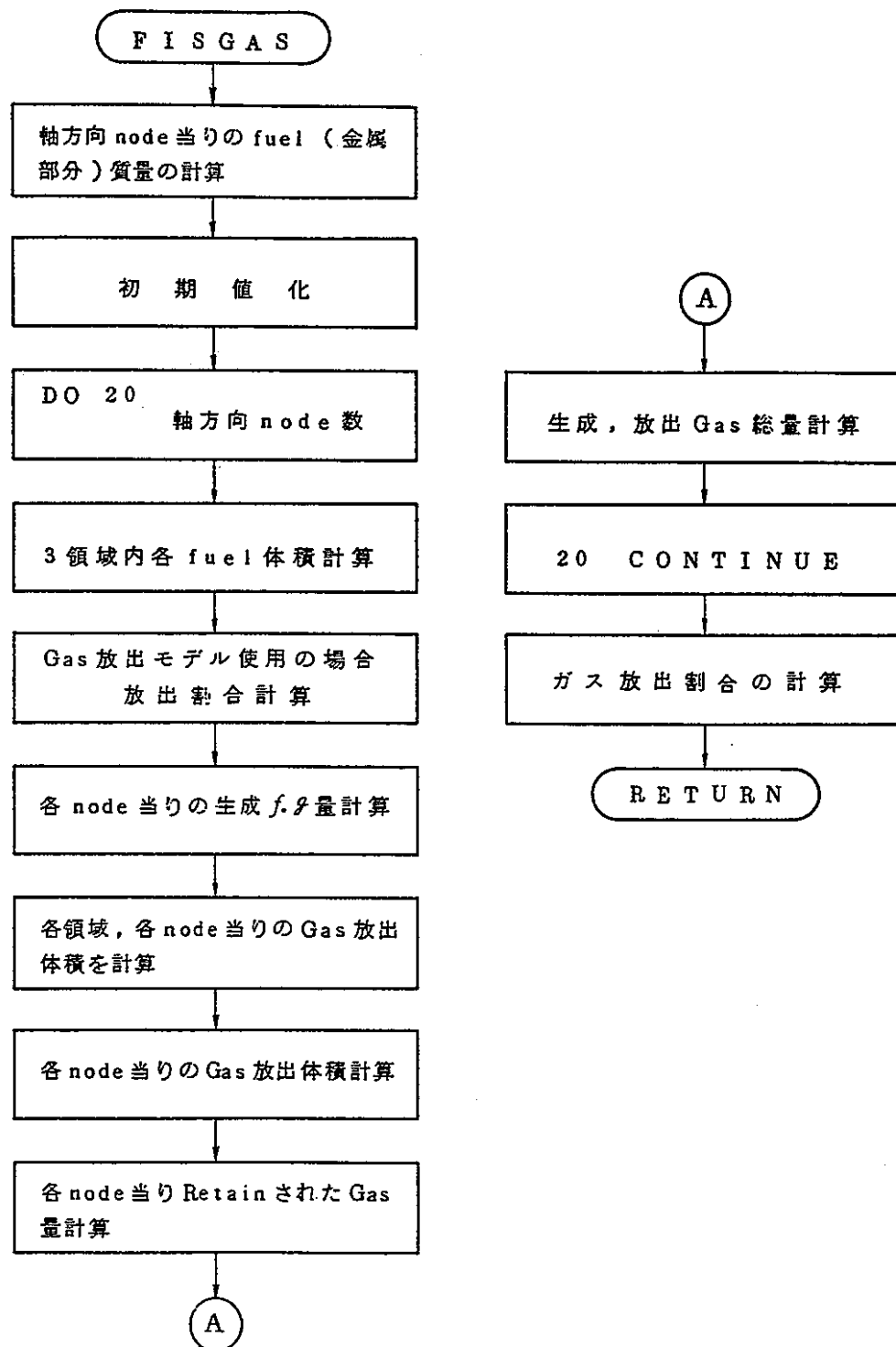


図2.5-5 FISGASのフローチャート

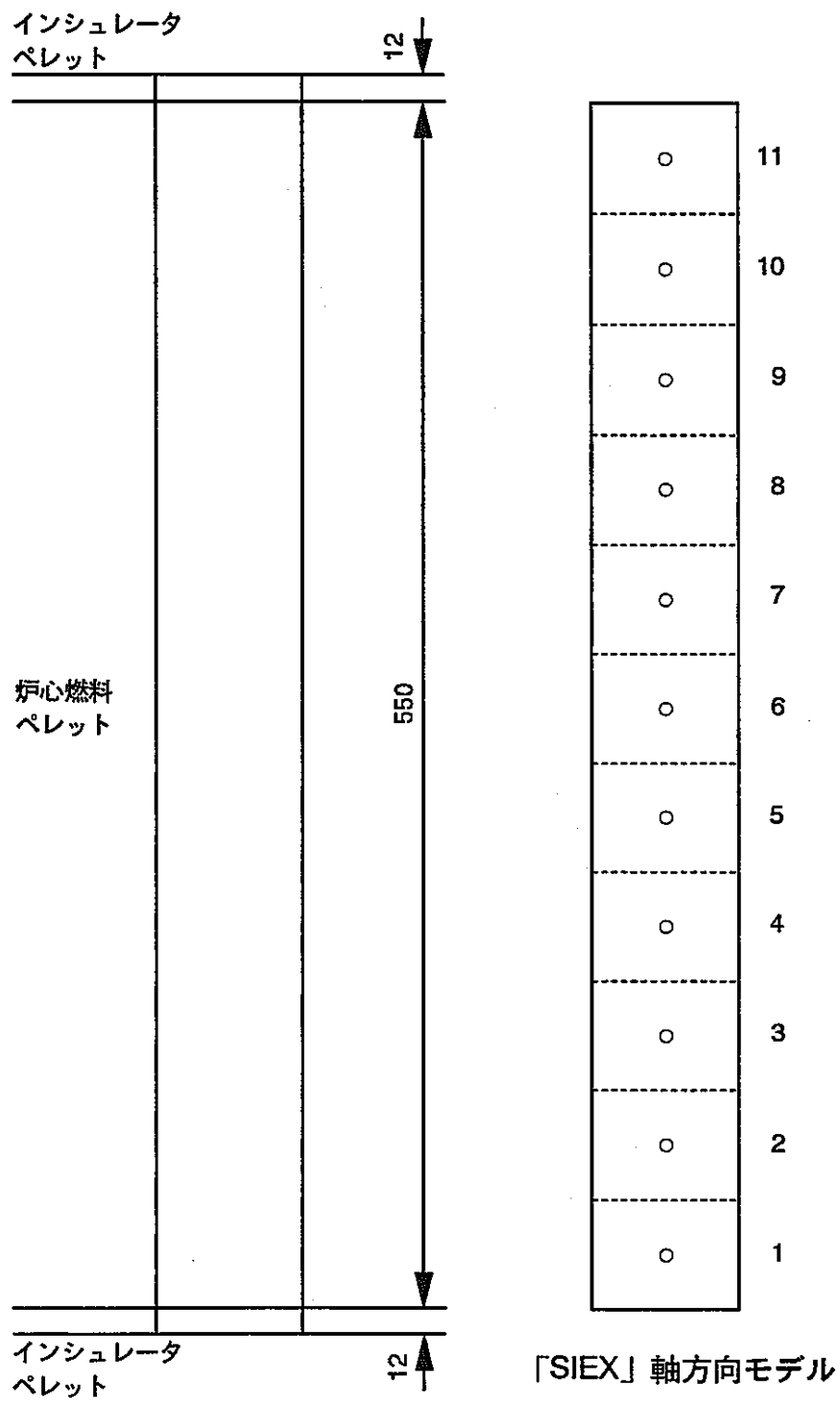


図2.5-6 温度計算用軸方向モデル

- ・ OX(000)—PFD001
- ・ 0-6cy 出力上昇
- ・ Step No. 60
- ・ 原子炉出力 68.95MW

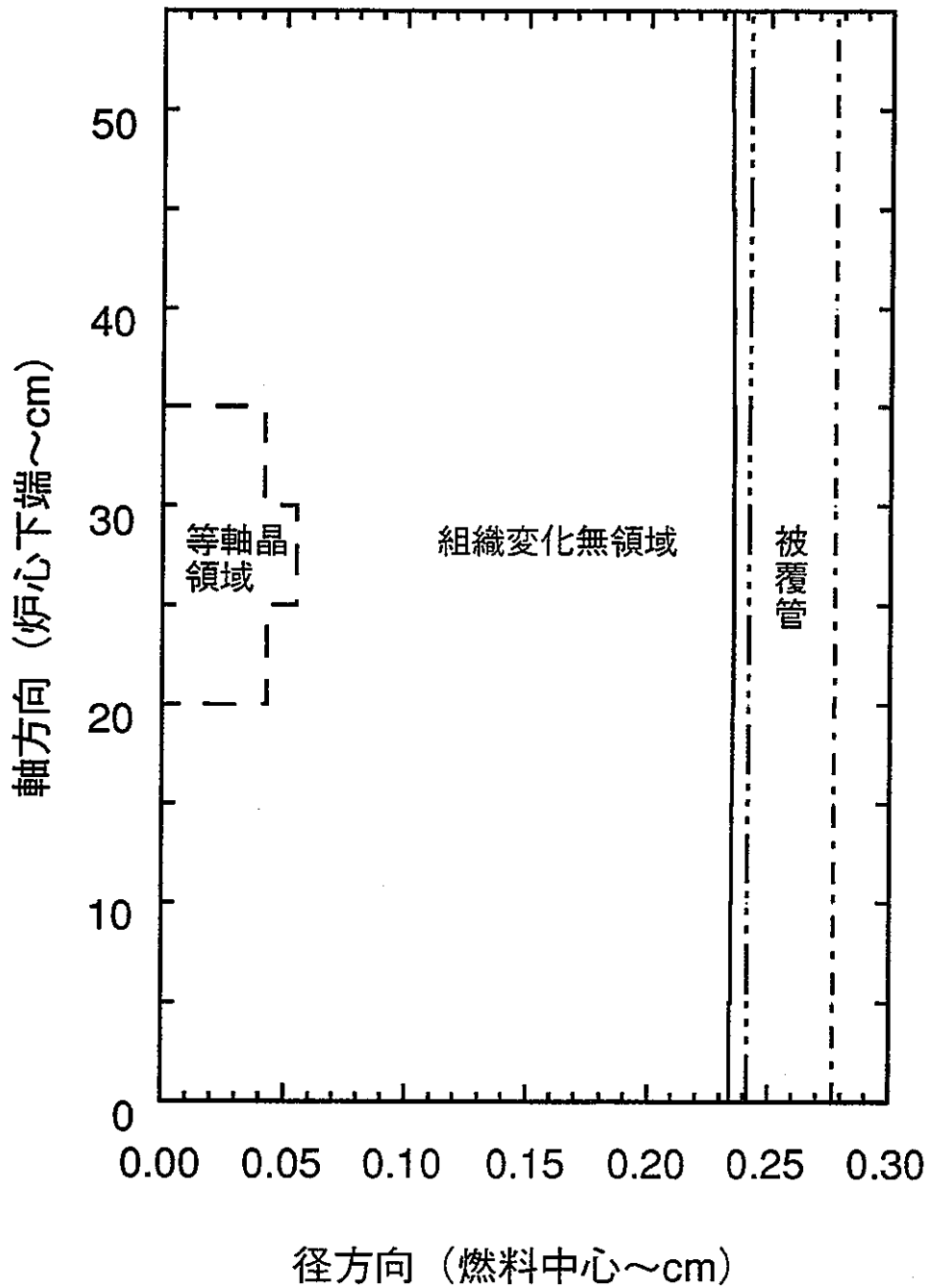


図2.5-7 第0サイクルにおける中心燃料集合体の燃料再結晶状態 (ステップ-60)

- ・ 0X(000)—PFD001
- ・ 0-6cy 出力上昇
- ・ Step No. 61
- ・ 原子炉出力 74.54MW

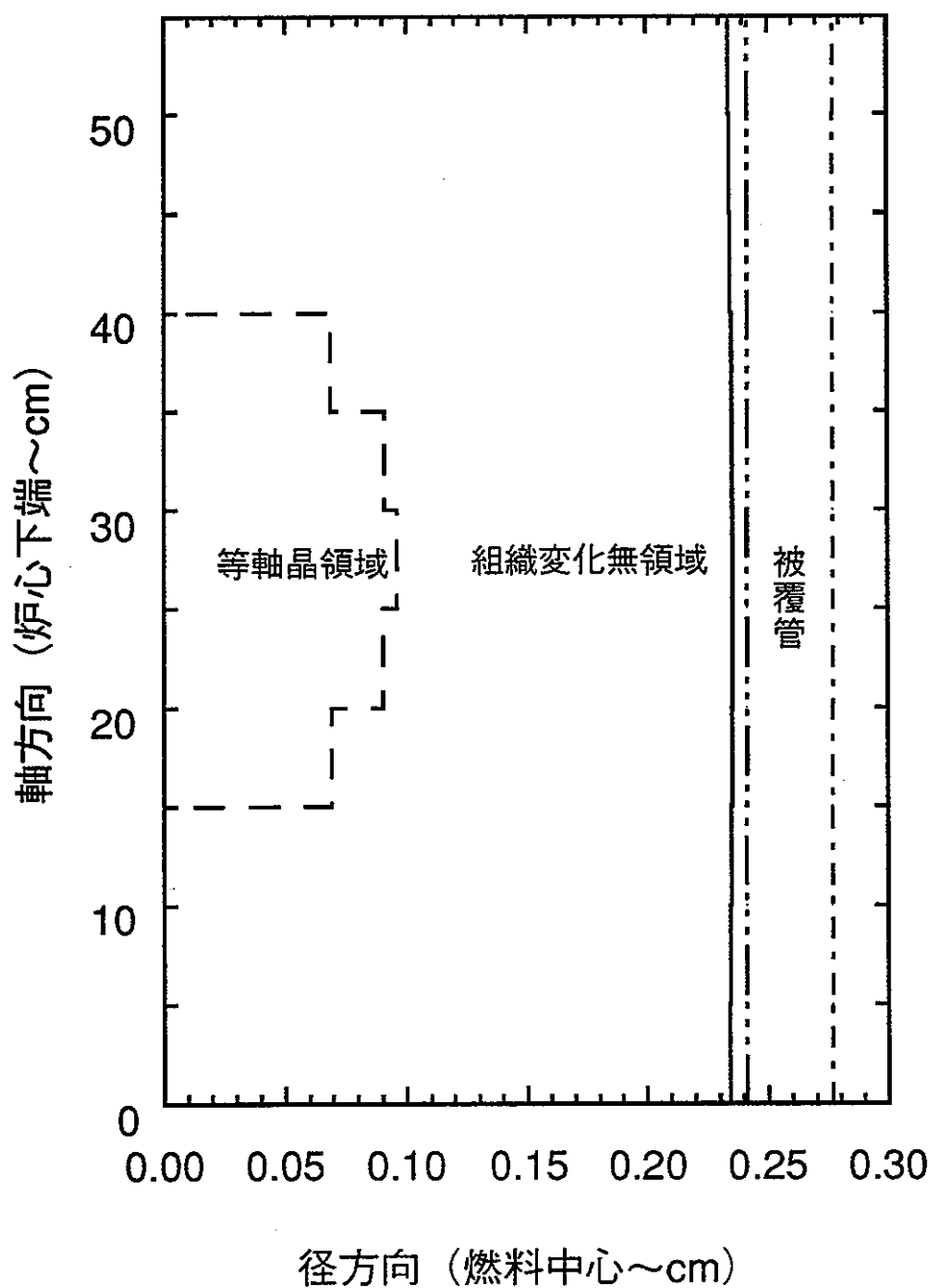


図2.5-8 第0サイクルにおける中心燃料集合体の燃料再結晶状態 (ステップ-61)

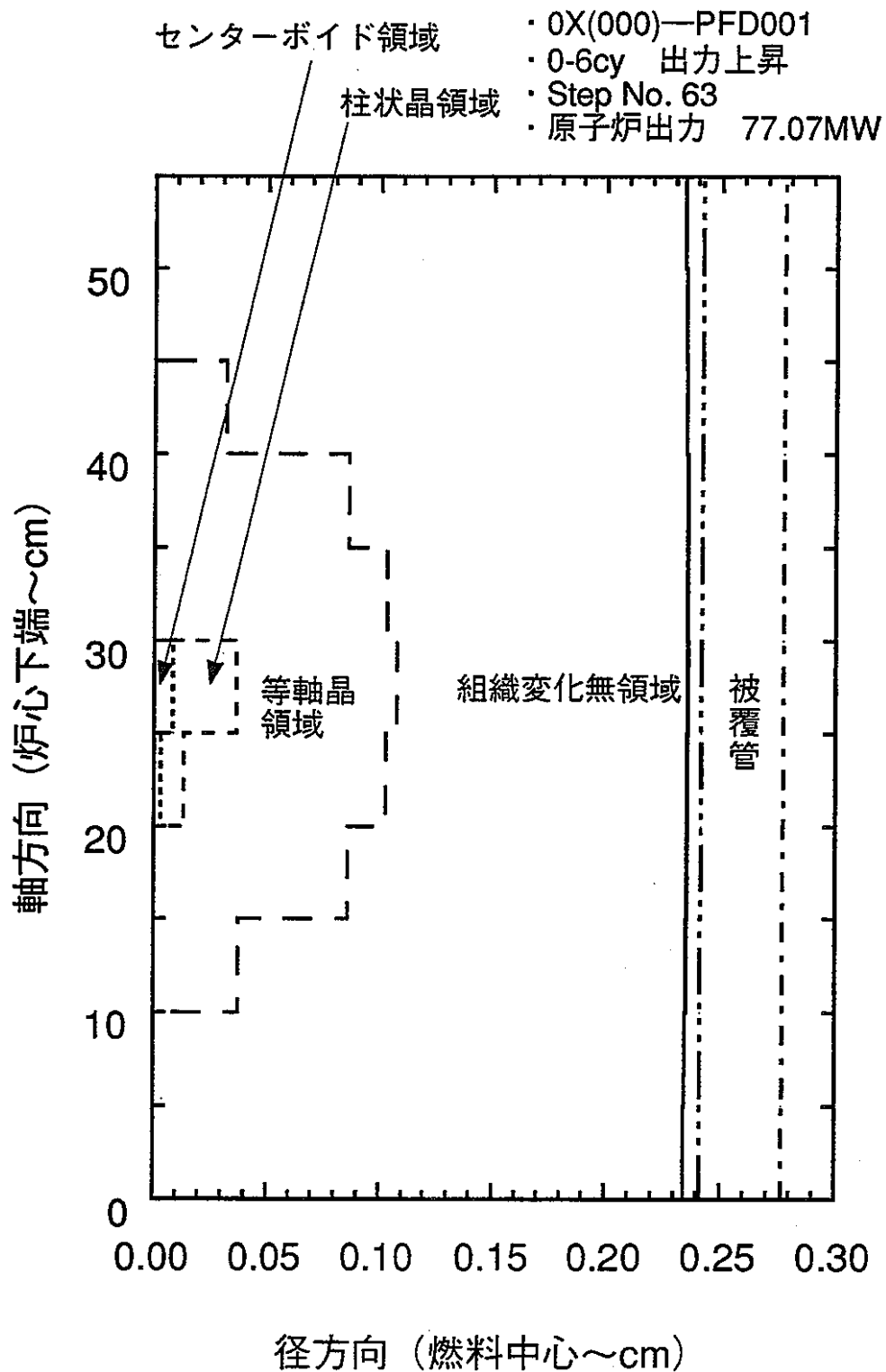


図2.5-9 第0サイクルにおける中心燃料集合体の燃料再結晶状態 (ステップ-63)

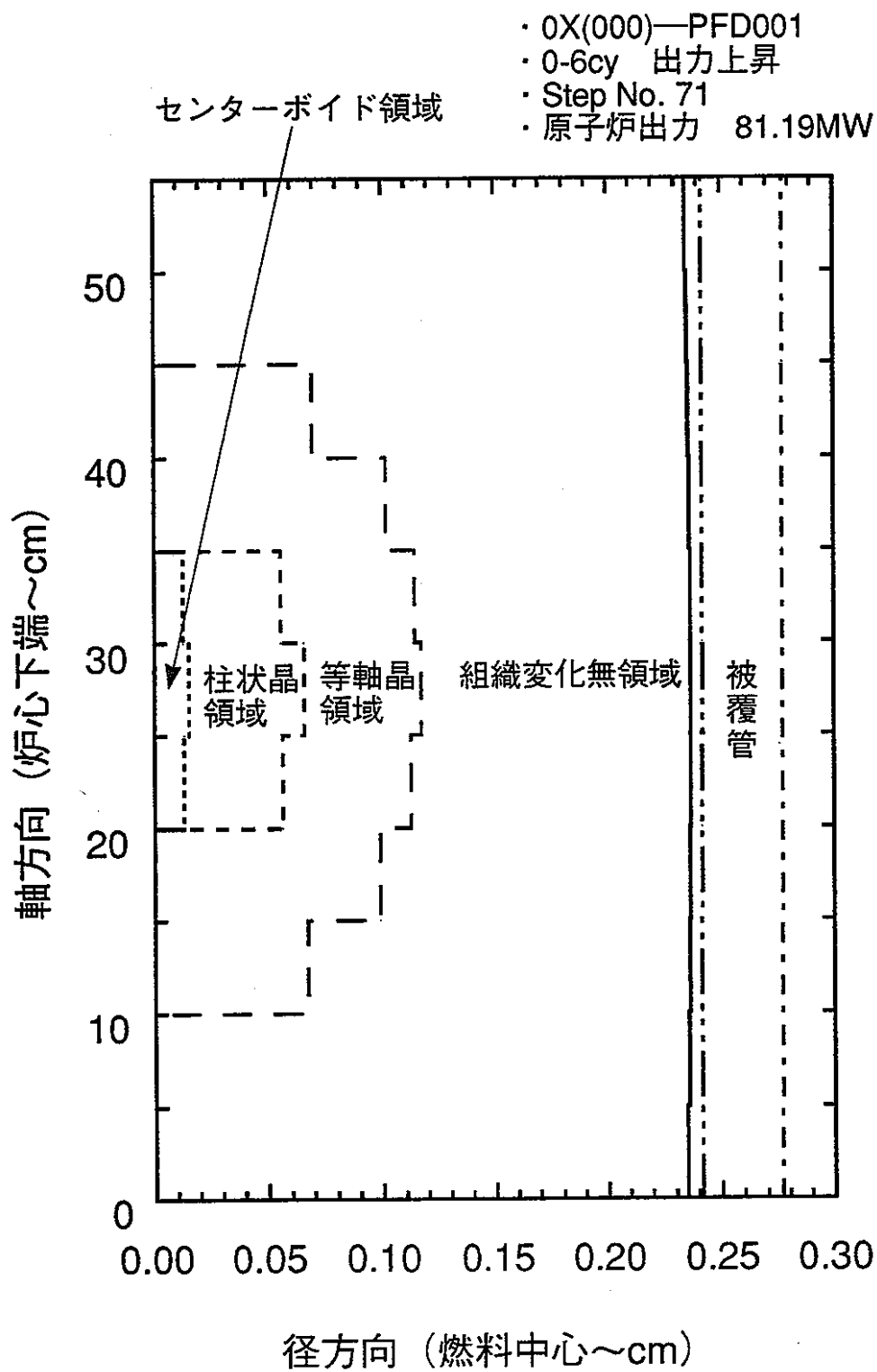


図2.5-10 第0サイクルにおける中心燃料集合体の燃料再結晶状態 (ステップ-71)

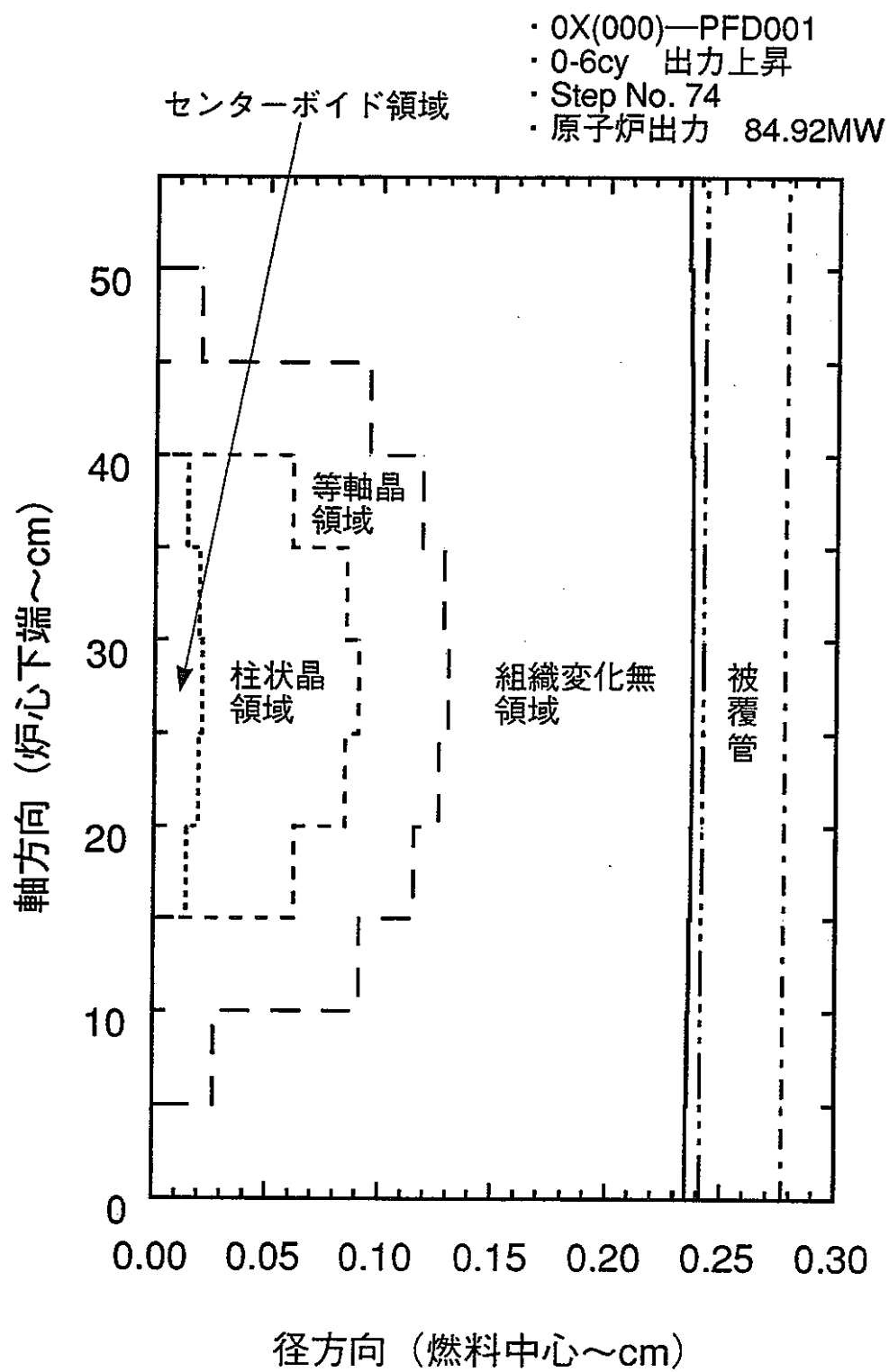


図2.5-11 第0サイクルにおける中心燃料集合体の燃料再結晶状態 (ステップ-74)

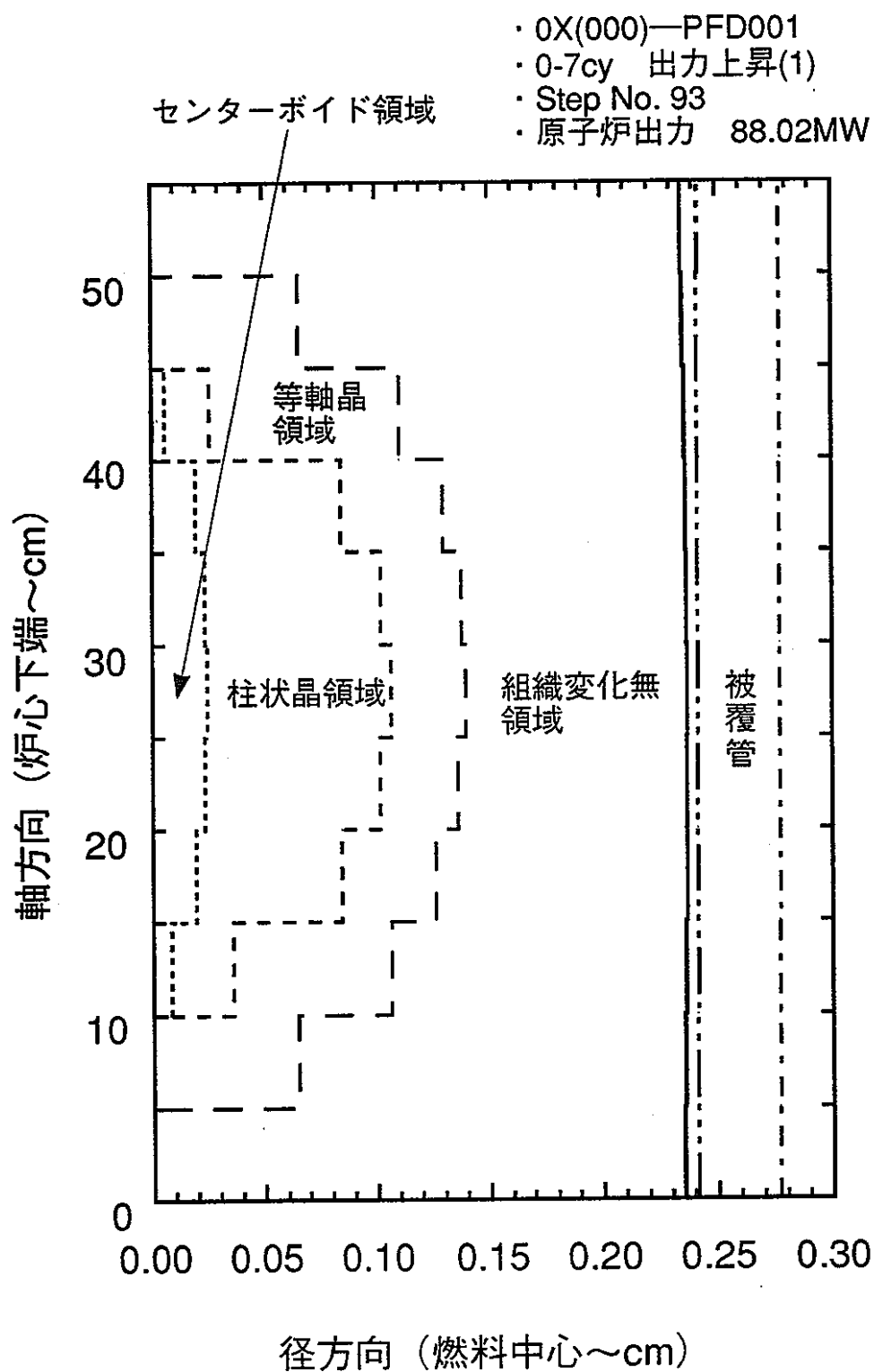


図2.5-12 第0サイクルにおける中心燃料集合体の燃料再結晶状態 (ステップ-93)

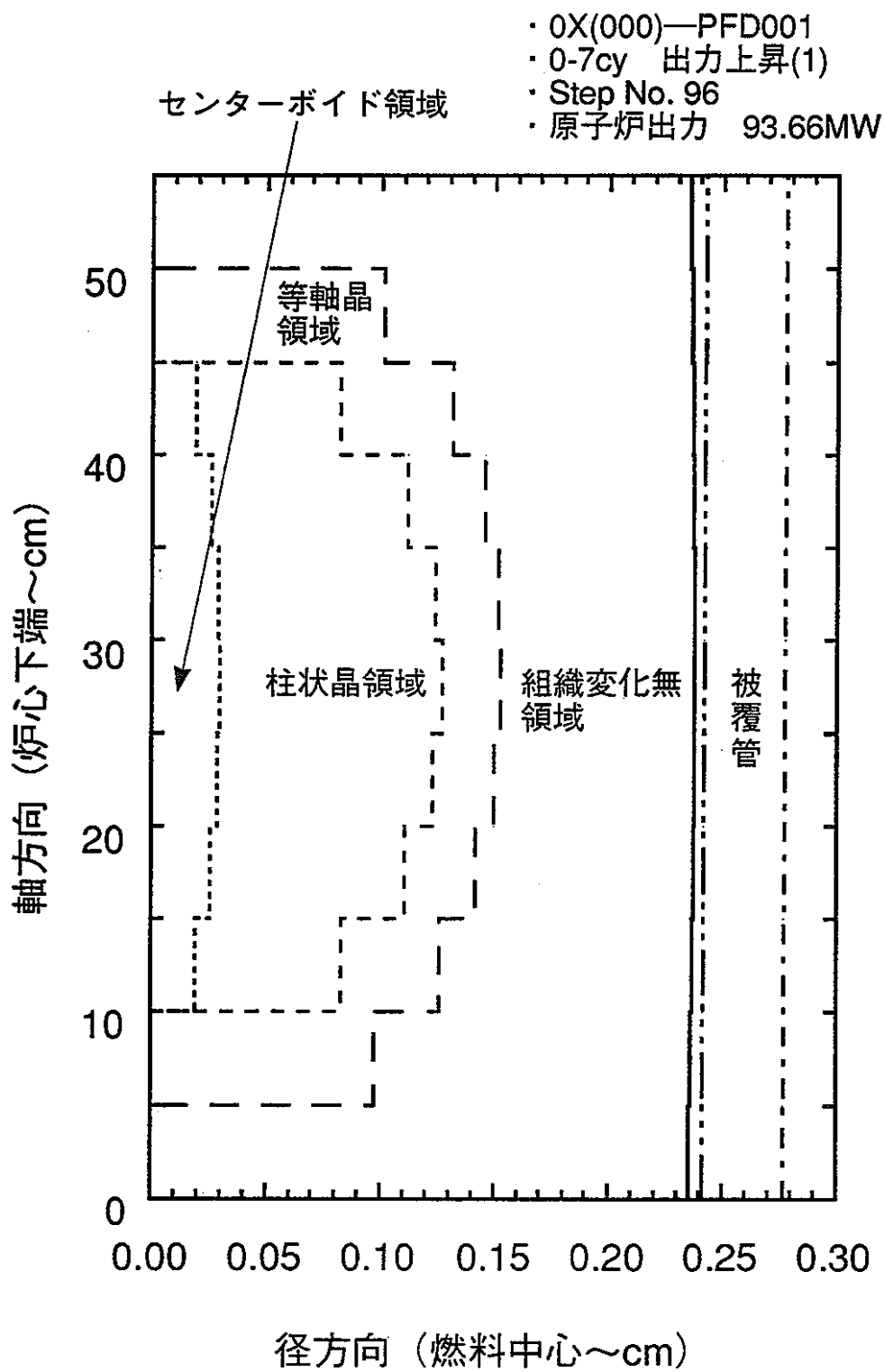


図2.5-13 第0サイクルにおける中心燃料集合体の燃料再結晶状態 (ステップ-96)

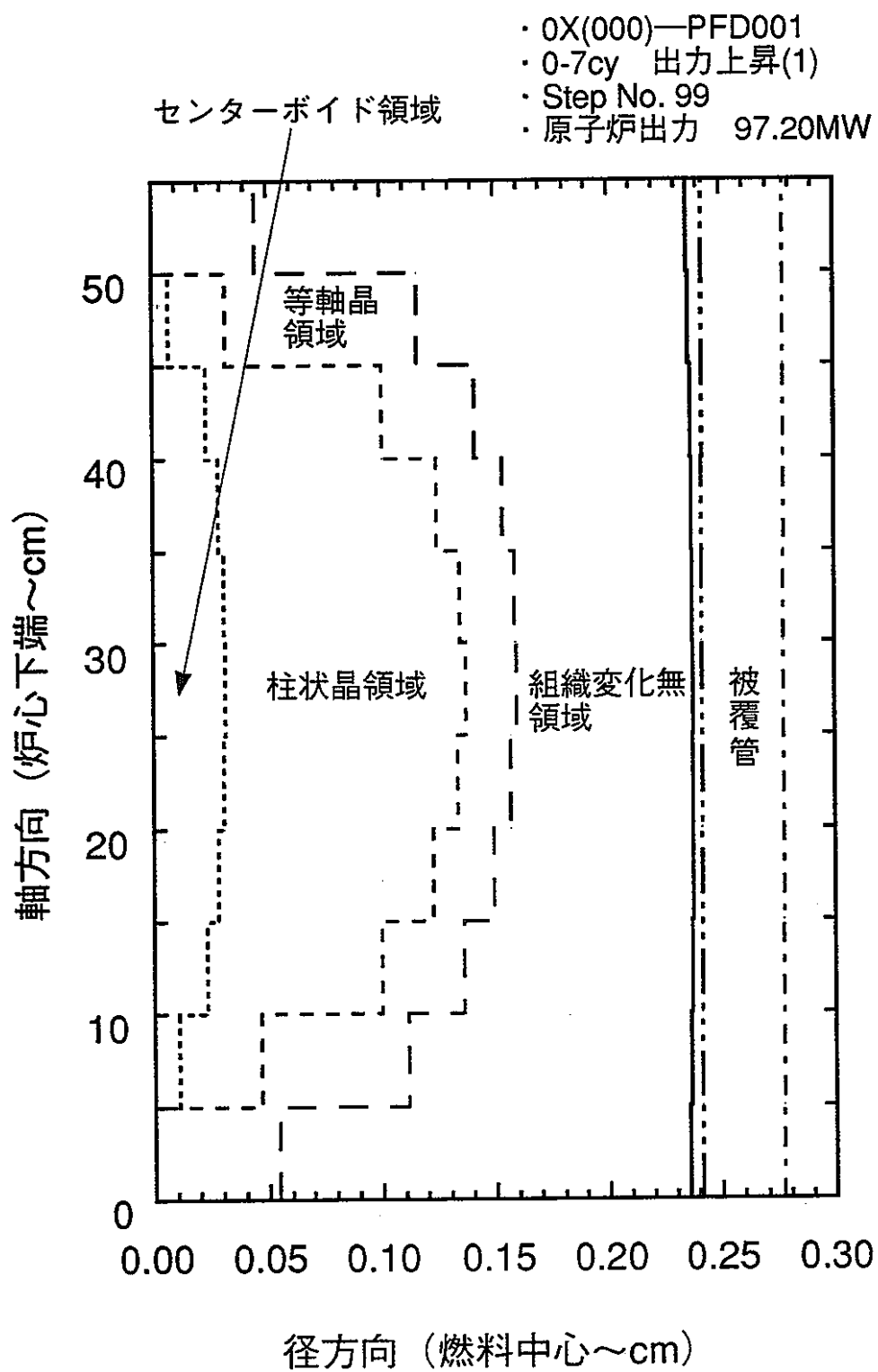


図2.5-14 第0サイクルにおける中心燃料集合体の燃料再結晶状態 (ステップ-99)

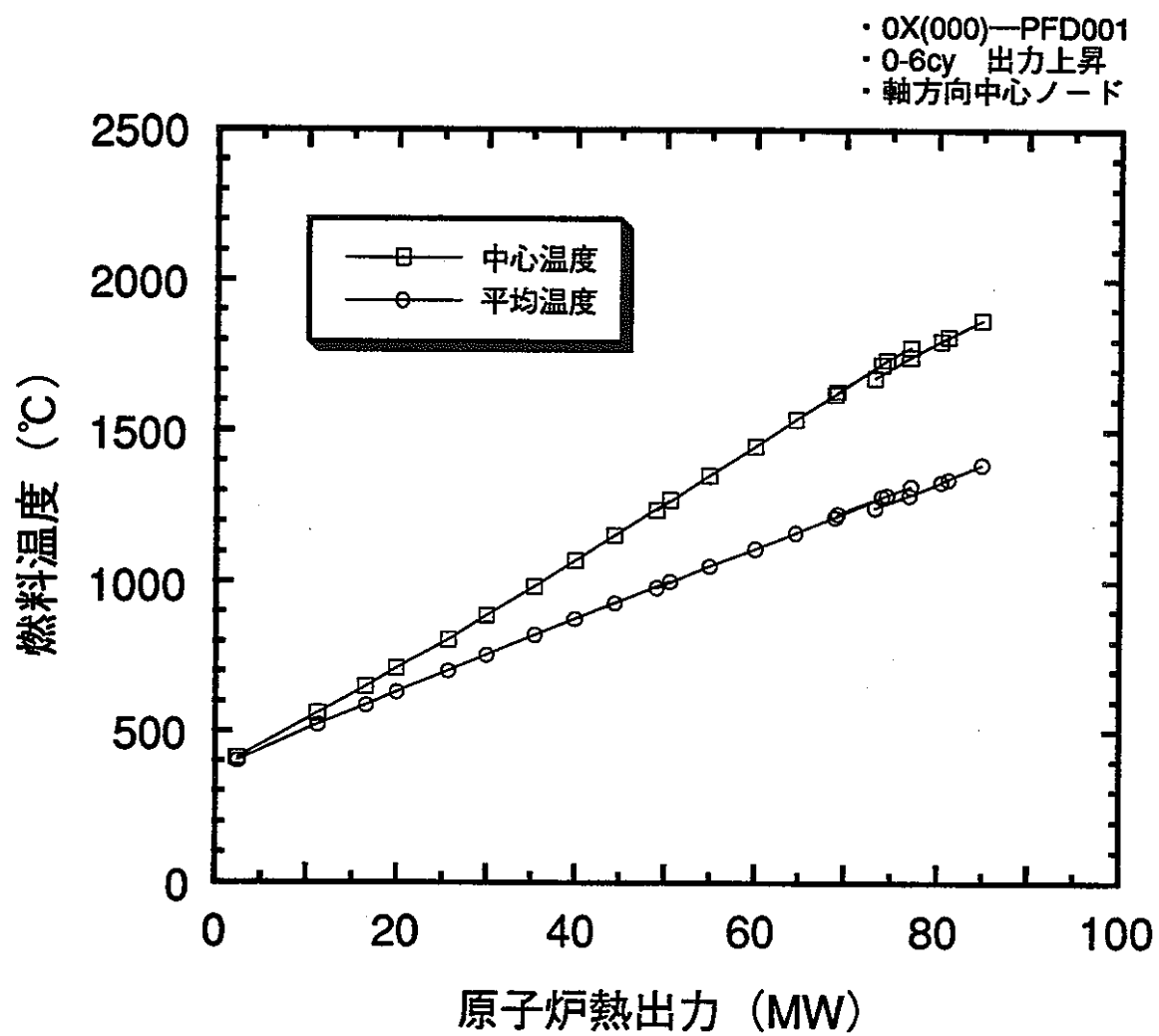


図2.5-15 第0-6サイクル出力上昇における燃料温度変化 (000-PFD001)

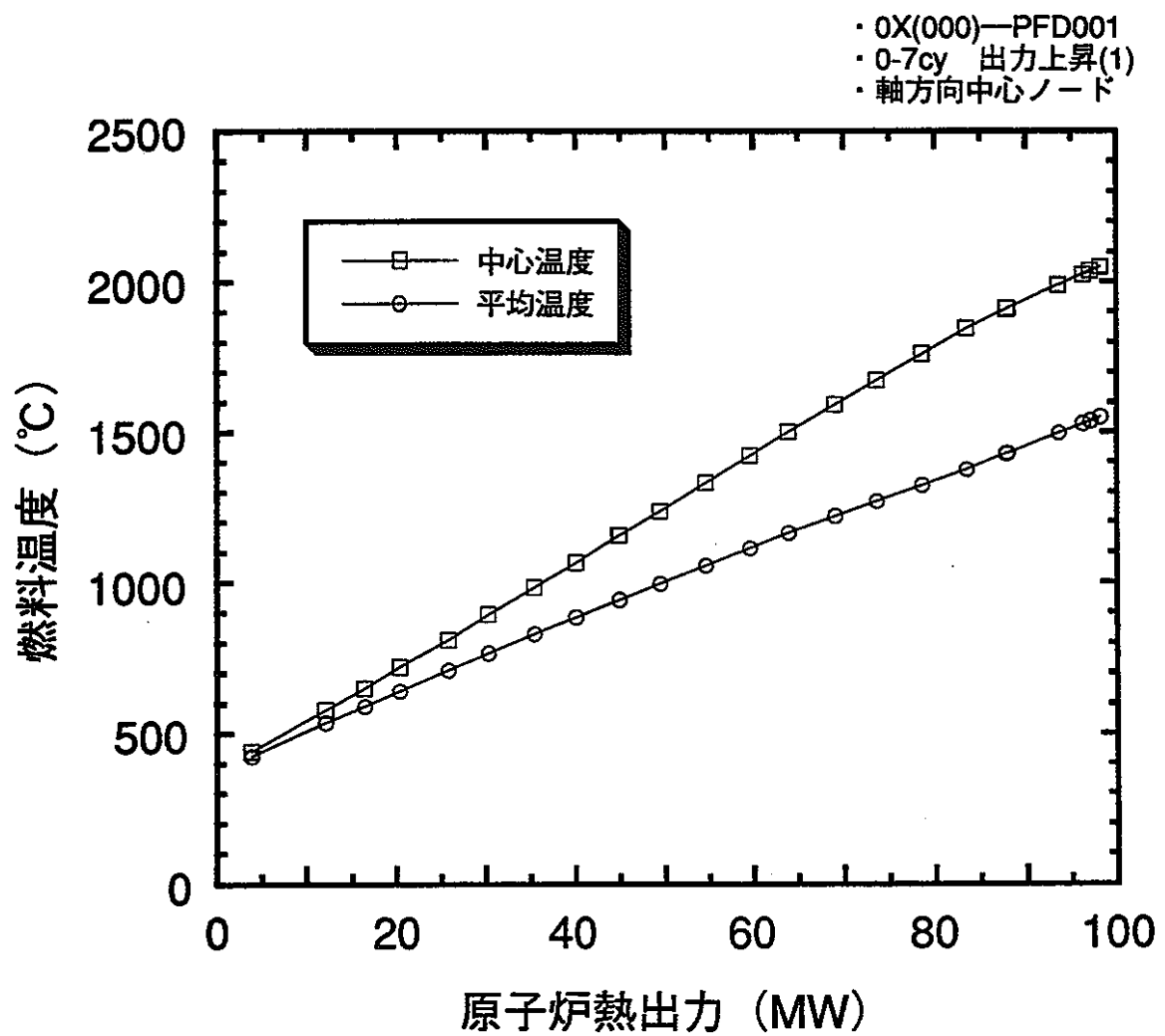


図2.5-16 第0-7サイクル出力上昇における燃料温度変化 (000-PFD001)

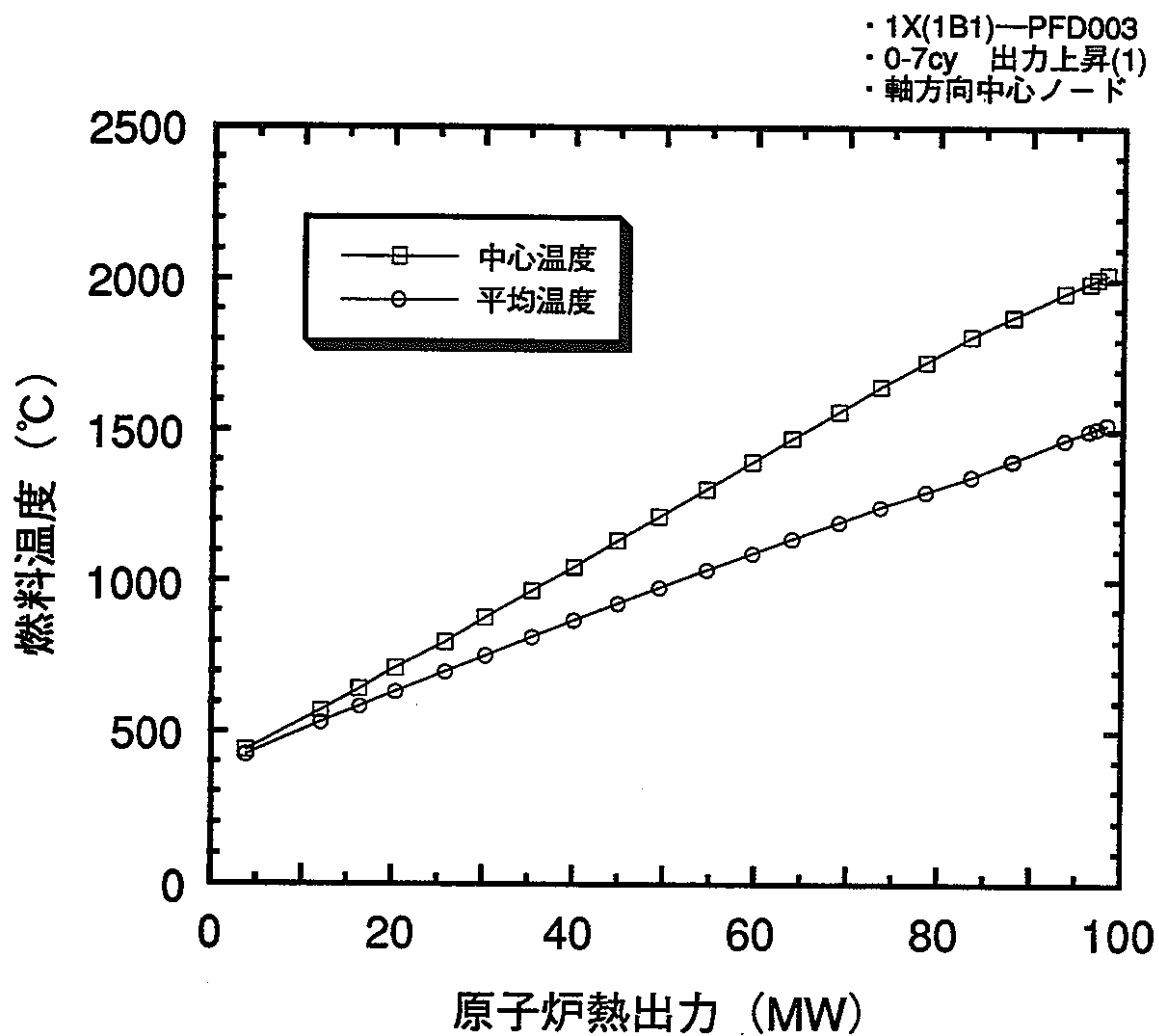


図2.5-17 第0-7サイクル出力上昇における燃料温度変化 (1B1-PFD003)

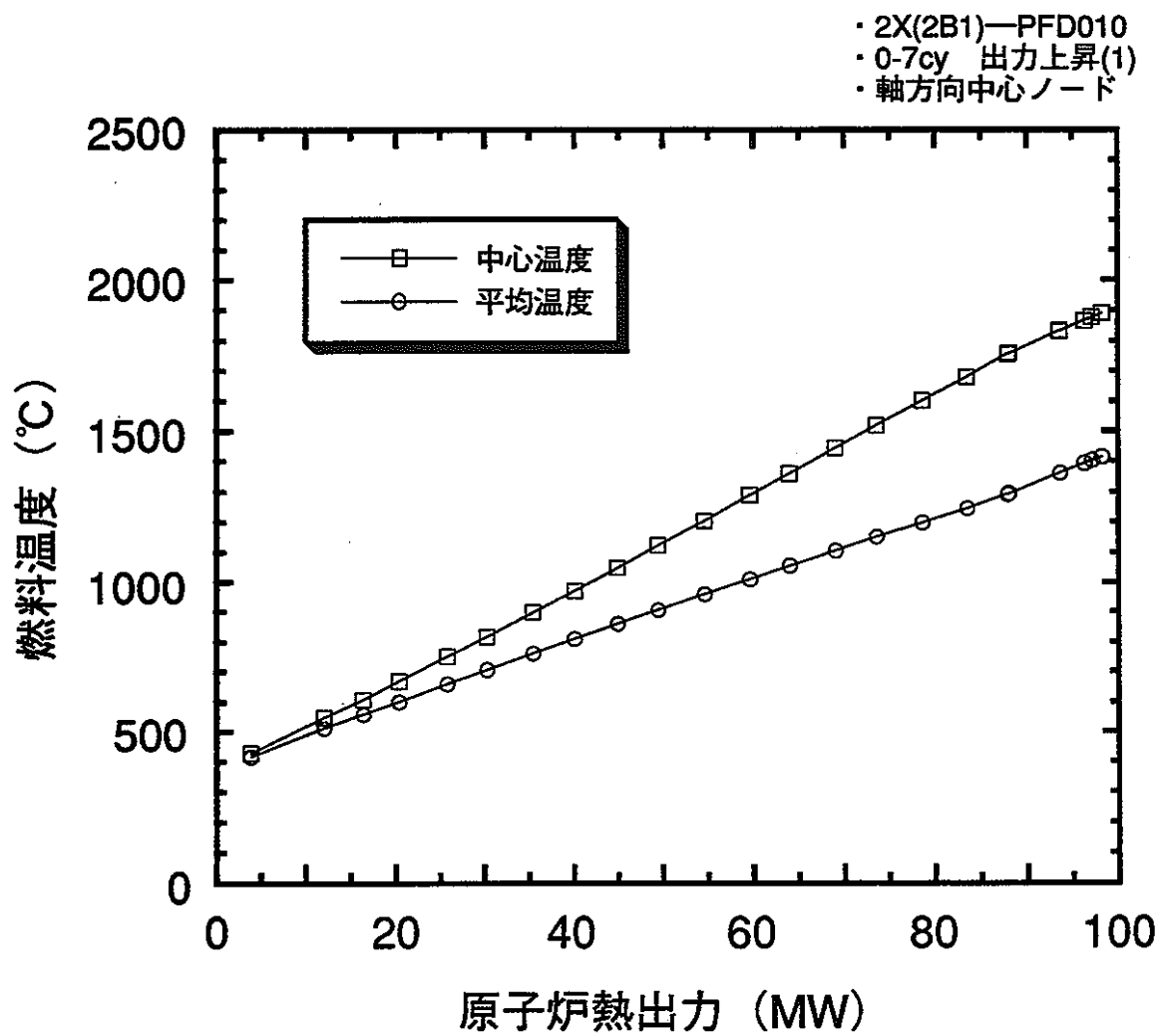


図2.5-18 第0-7サイクル出力上昇における燃料温度変化 (2B1-PFD010)

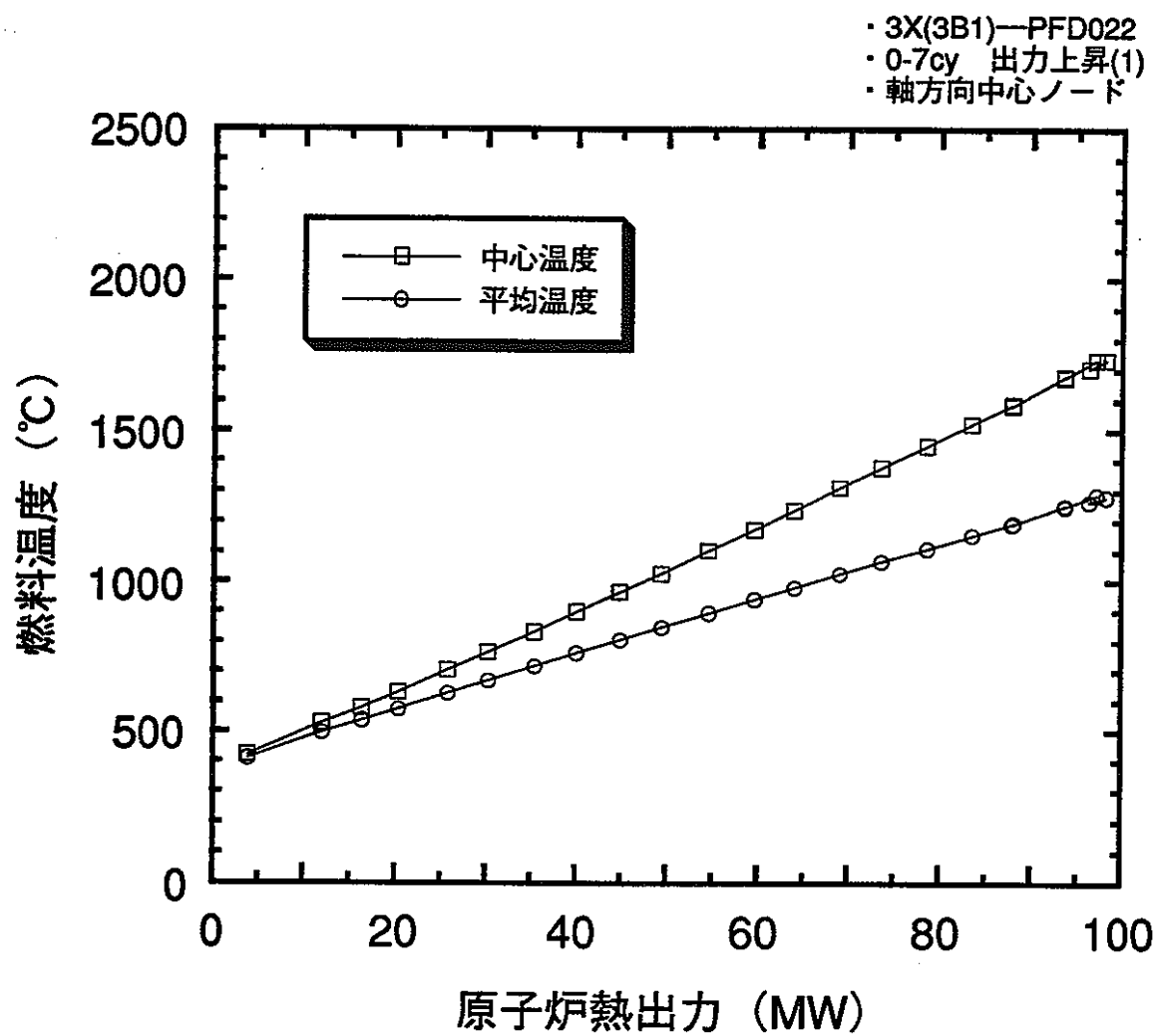


図2.5-19 第0-7サイクル出力上昇における燃料温度変化 (3B1-PFD022)

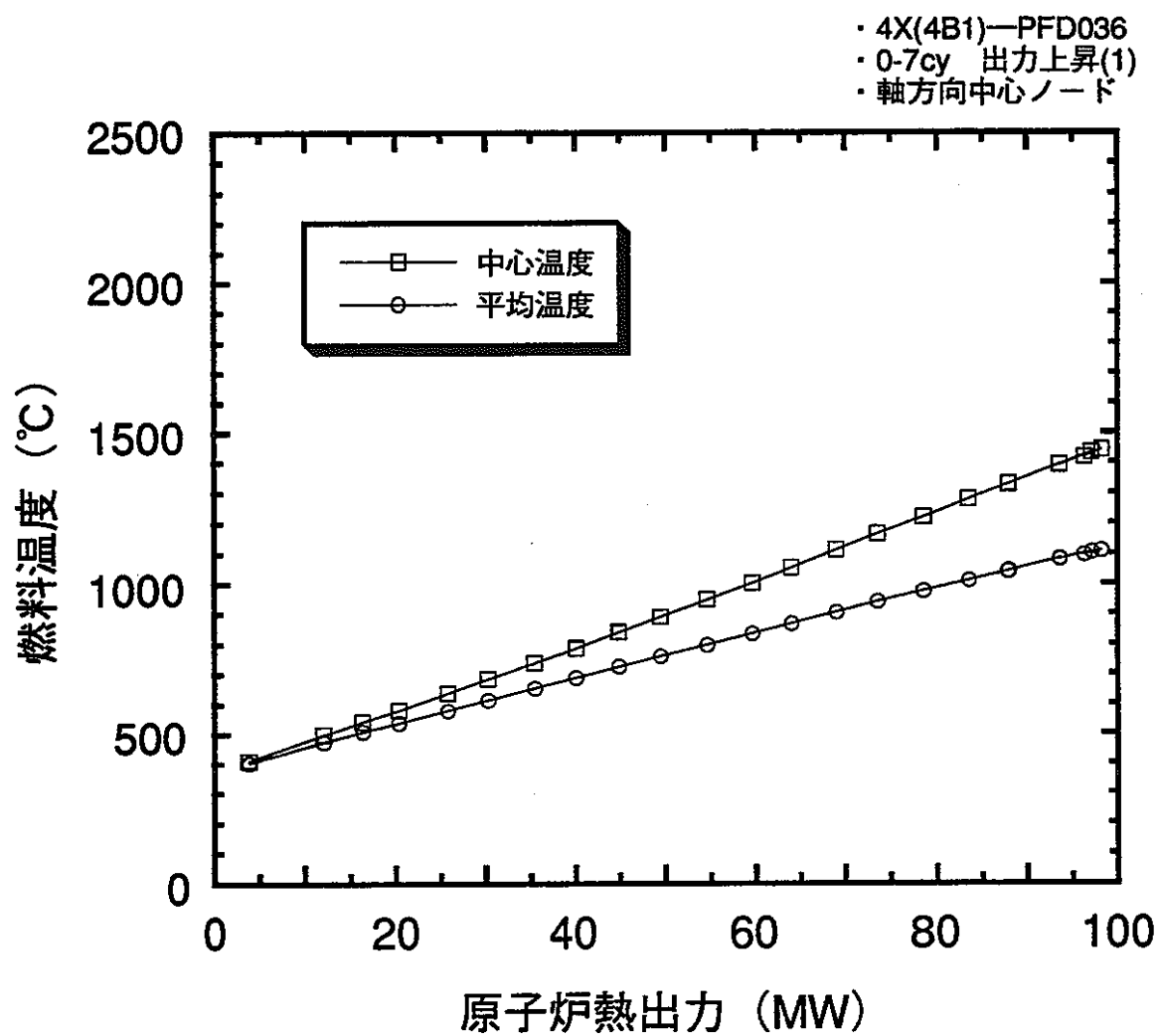


図2.5-20 第0-7サイクル出力上昇における燃料温度変化 (4B1-PFD036)

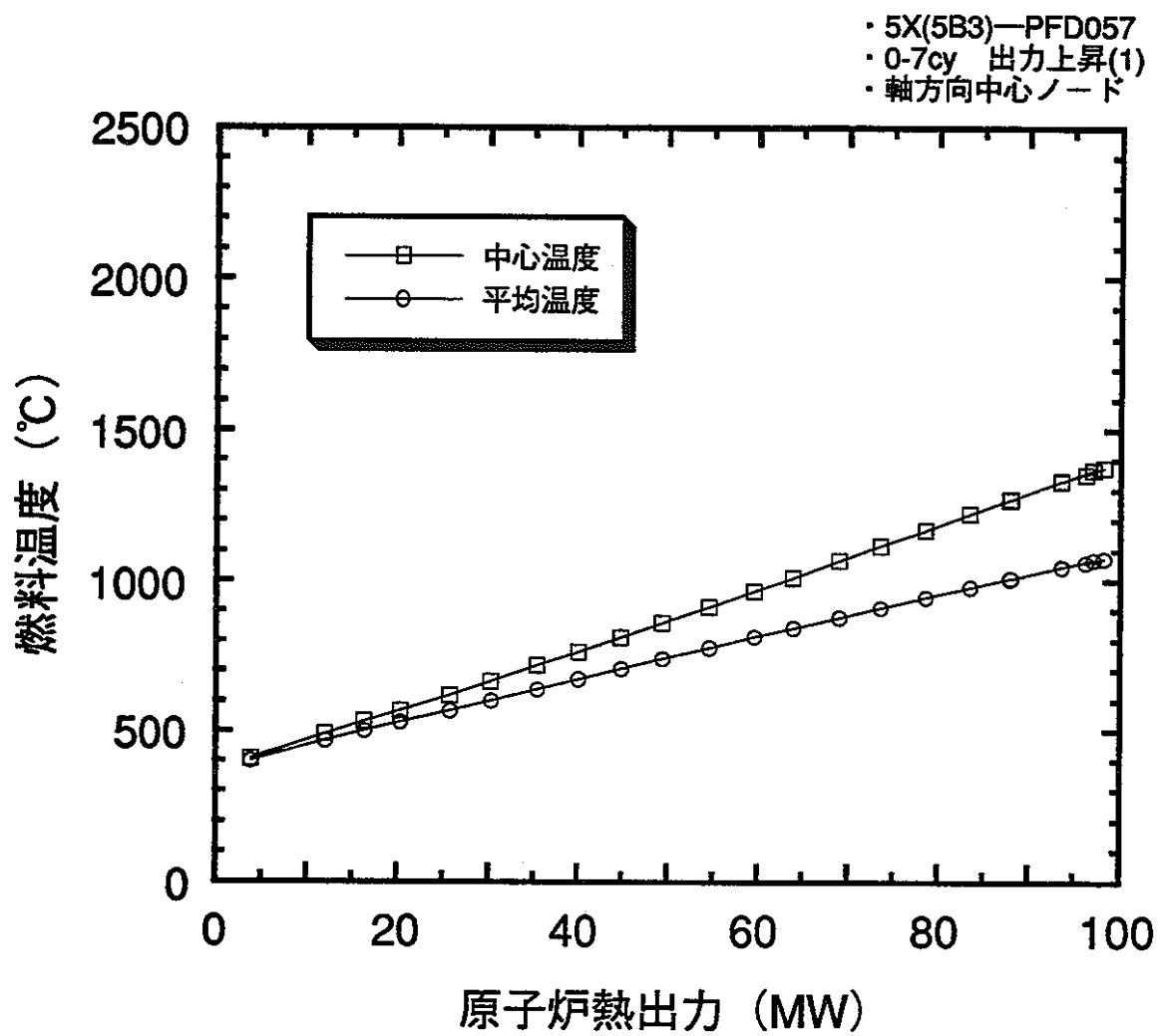


図2.5-21 第0-7サイクル出力上昇における燃料温度変化 (5B3-PFD057)

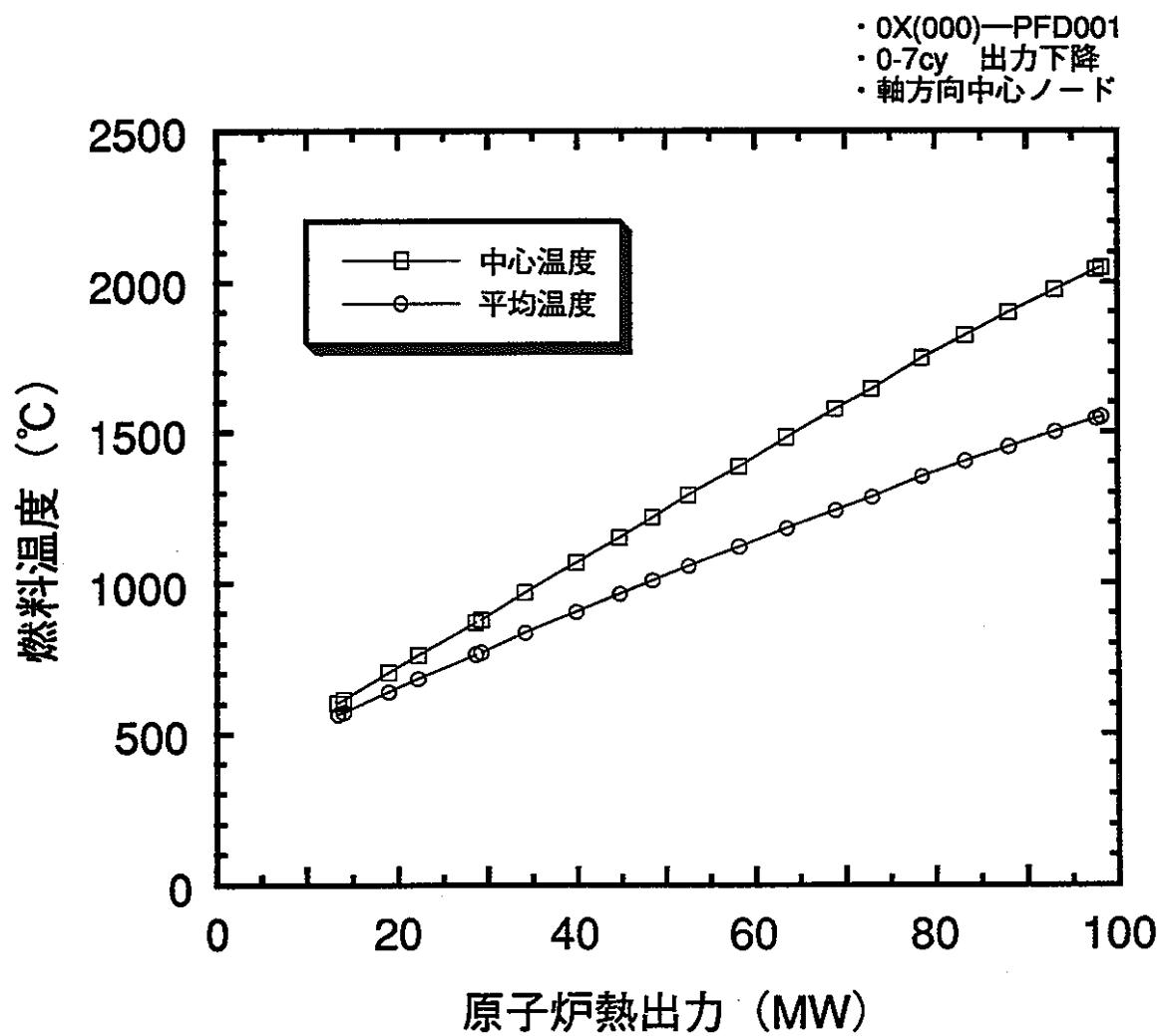


図2.5-22 第0-7サイクル出力下降における燃料温度変化 (000-PFD001)

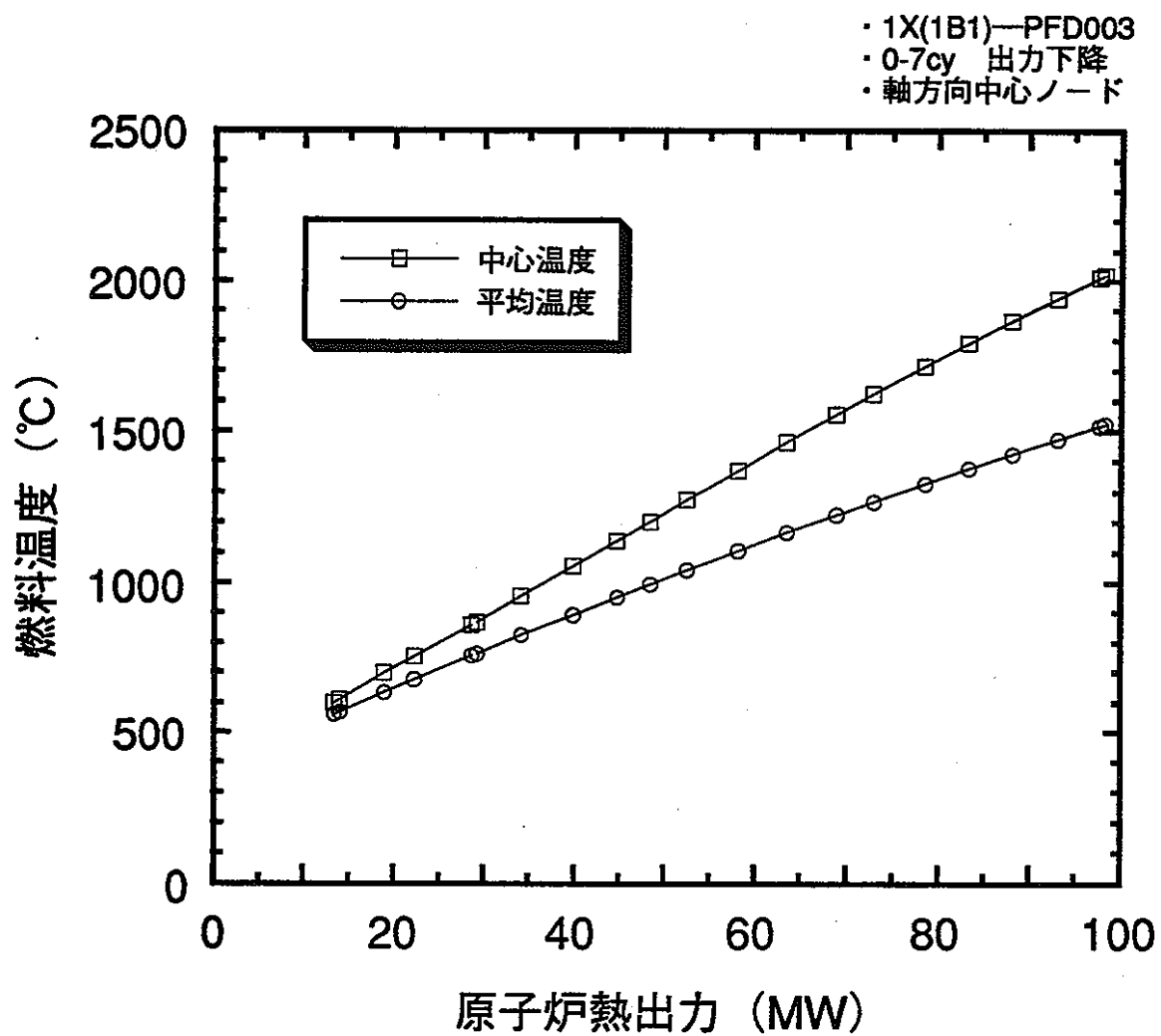


図2.5-23 第0-7サイクル出力下降における燃料温度変化 (1B1-PFD003)

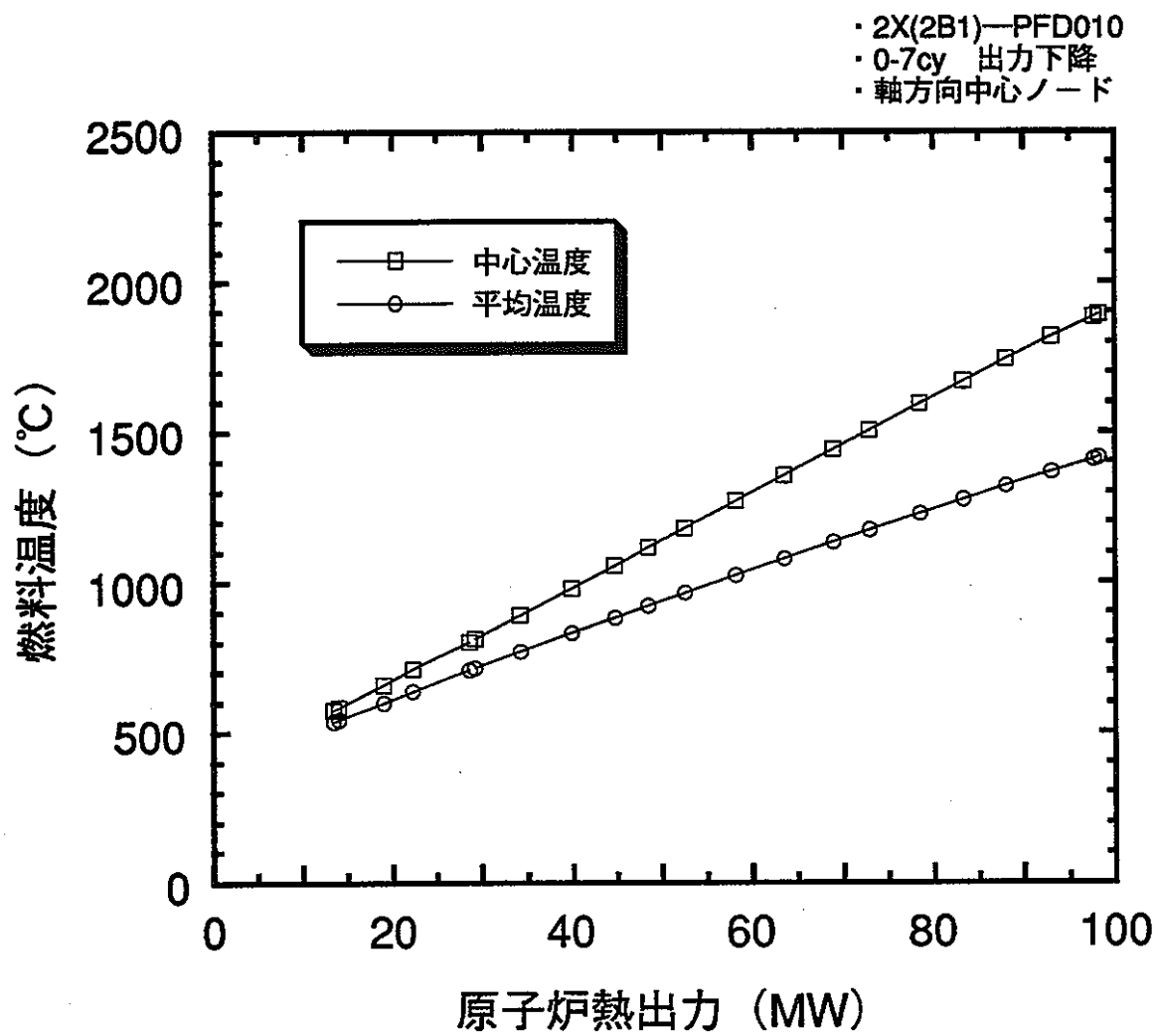


図2.5-24 第0-7サイクル出力下降における燃料温度変化 (2B1-PFD010)

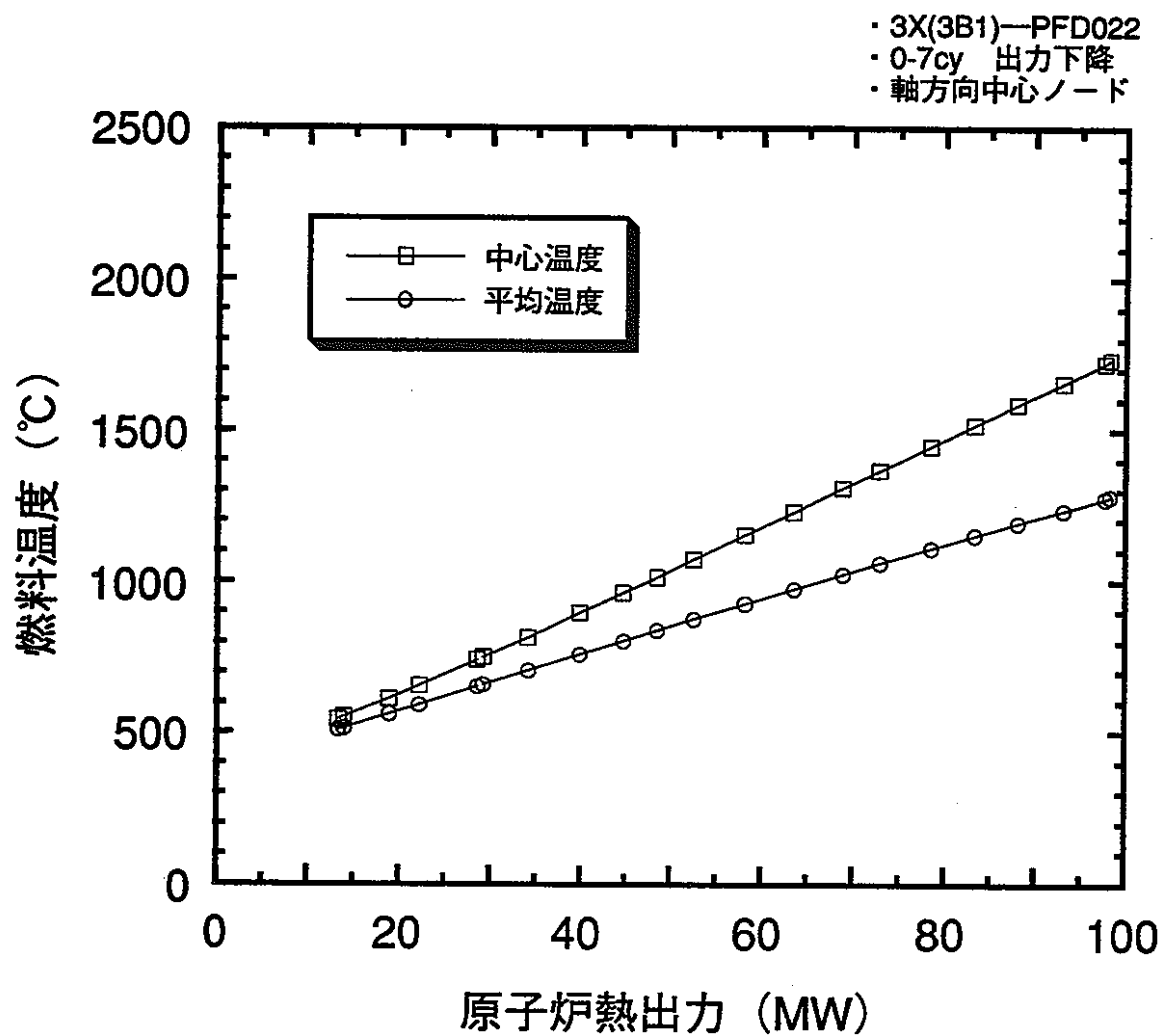


図2.5-25 第0-7サイクル出力下降における燃料温度変化 (3B1-PFD022)

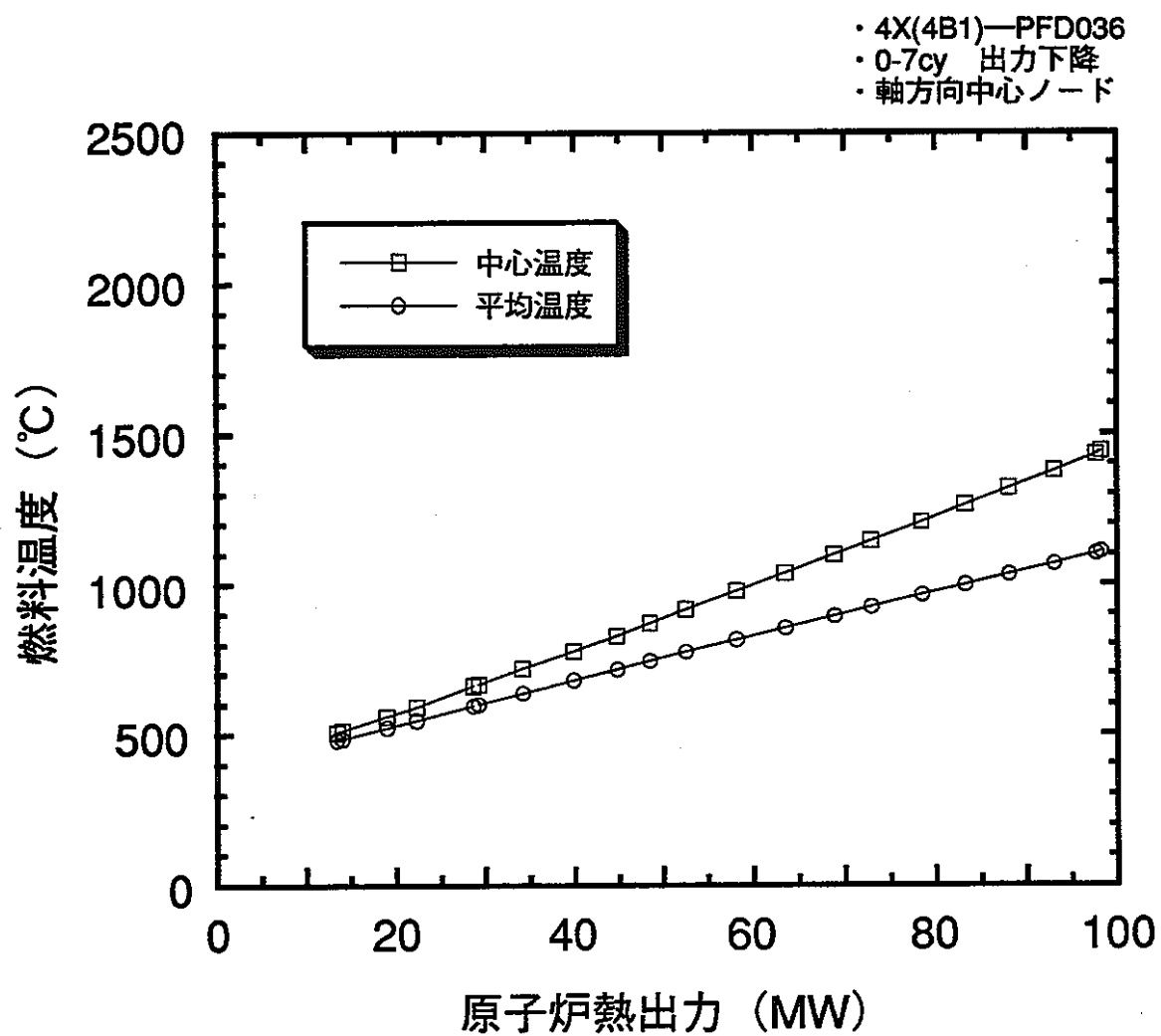


図2.5-26 第0-7サイクル出力下降における燃料温度変化 (4B1-PFD036)

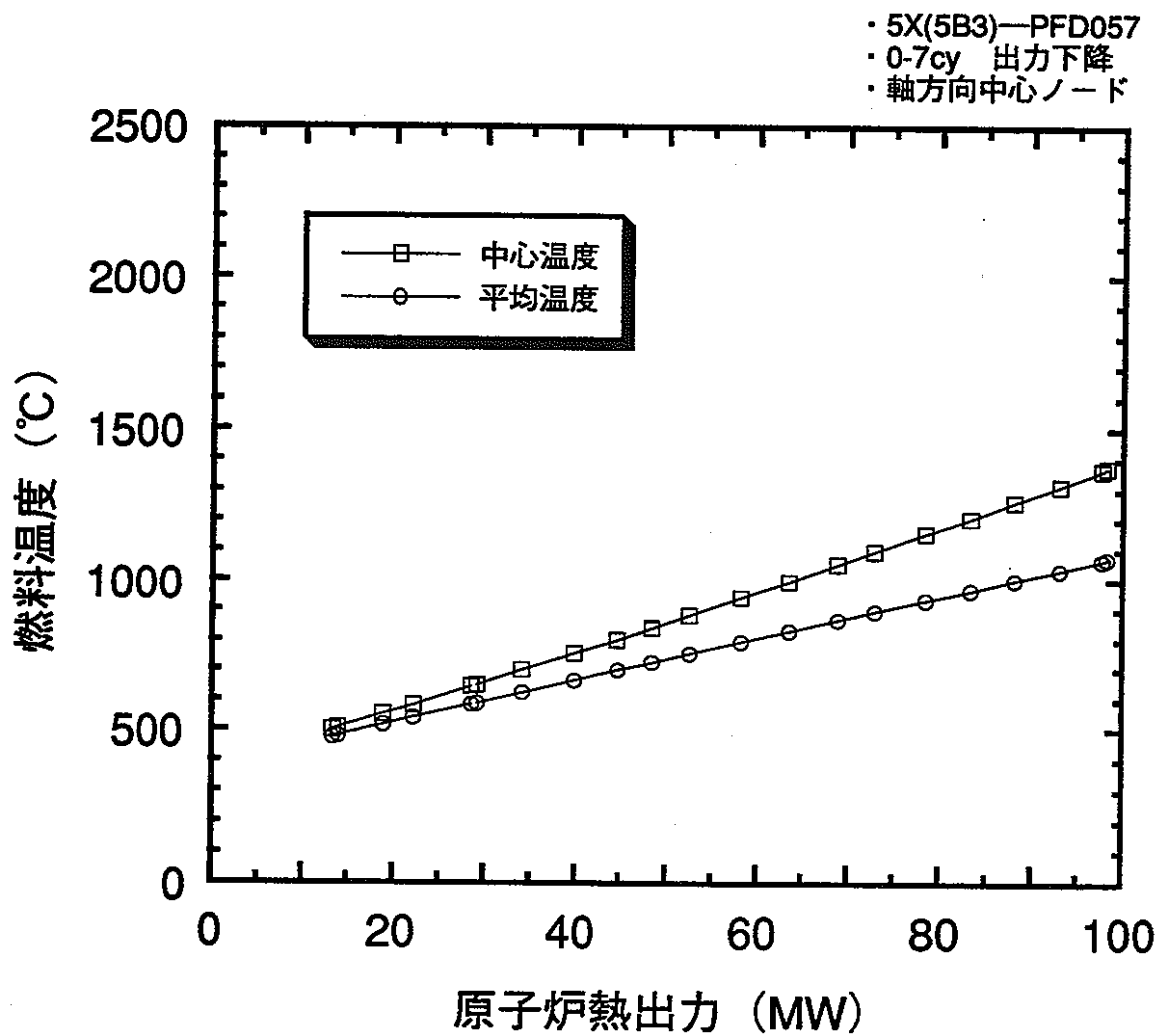


図2.5-27 第0-7サイクル出力下降における燃料温度変化 (5B3-PFD057)

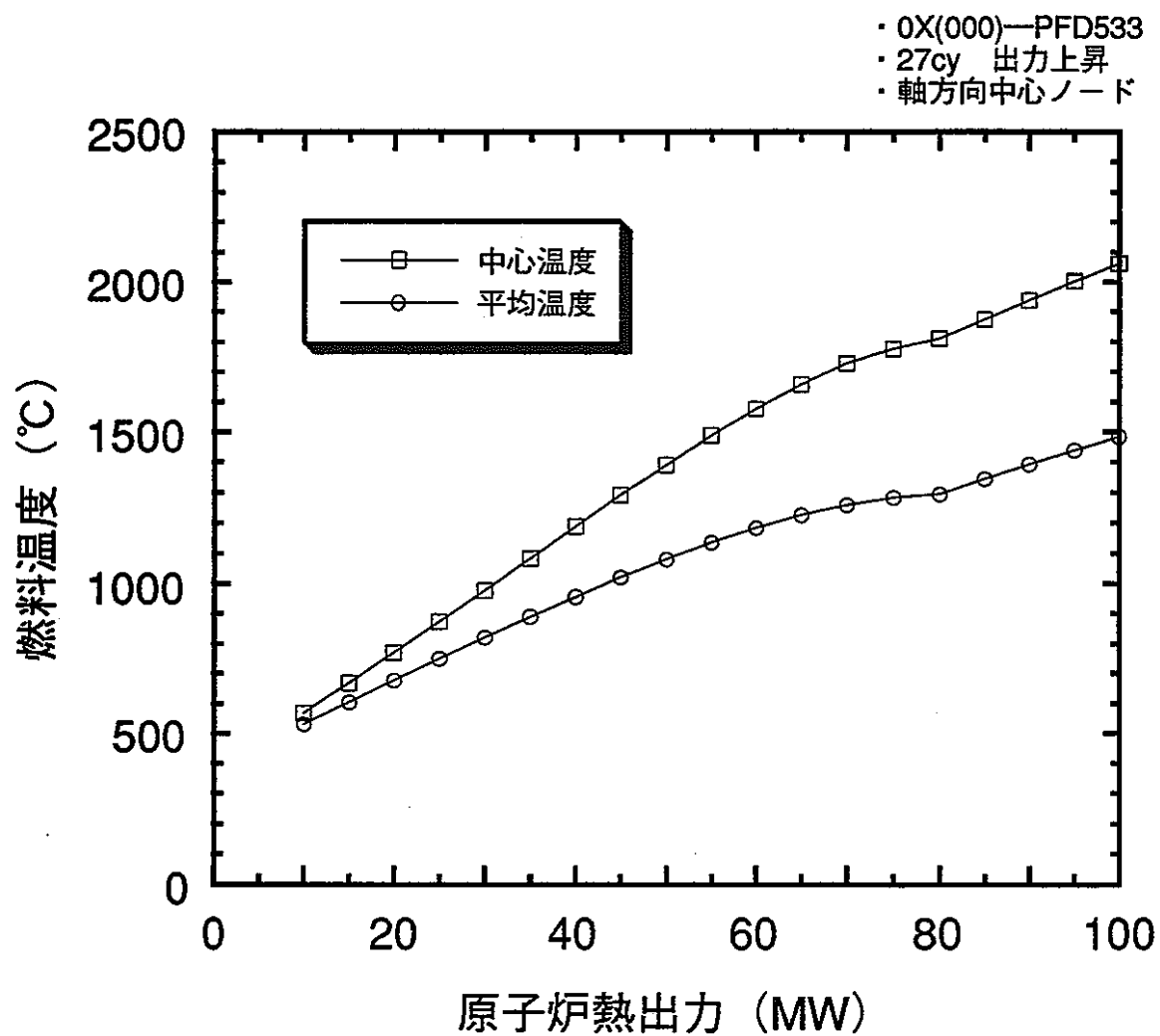


図2.5-28 第27サイクル初期出力上昇における燃料温度変化 (000-PFD533)

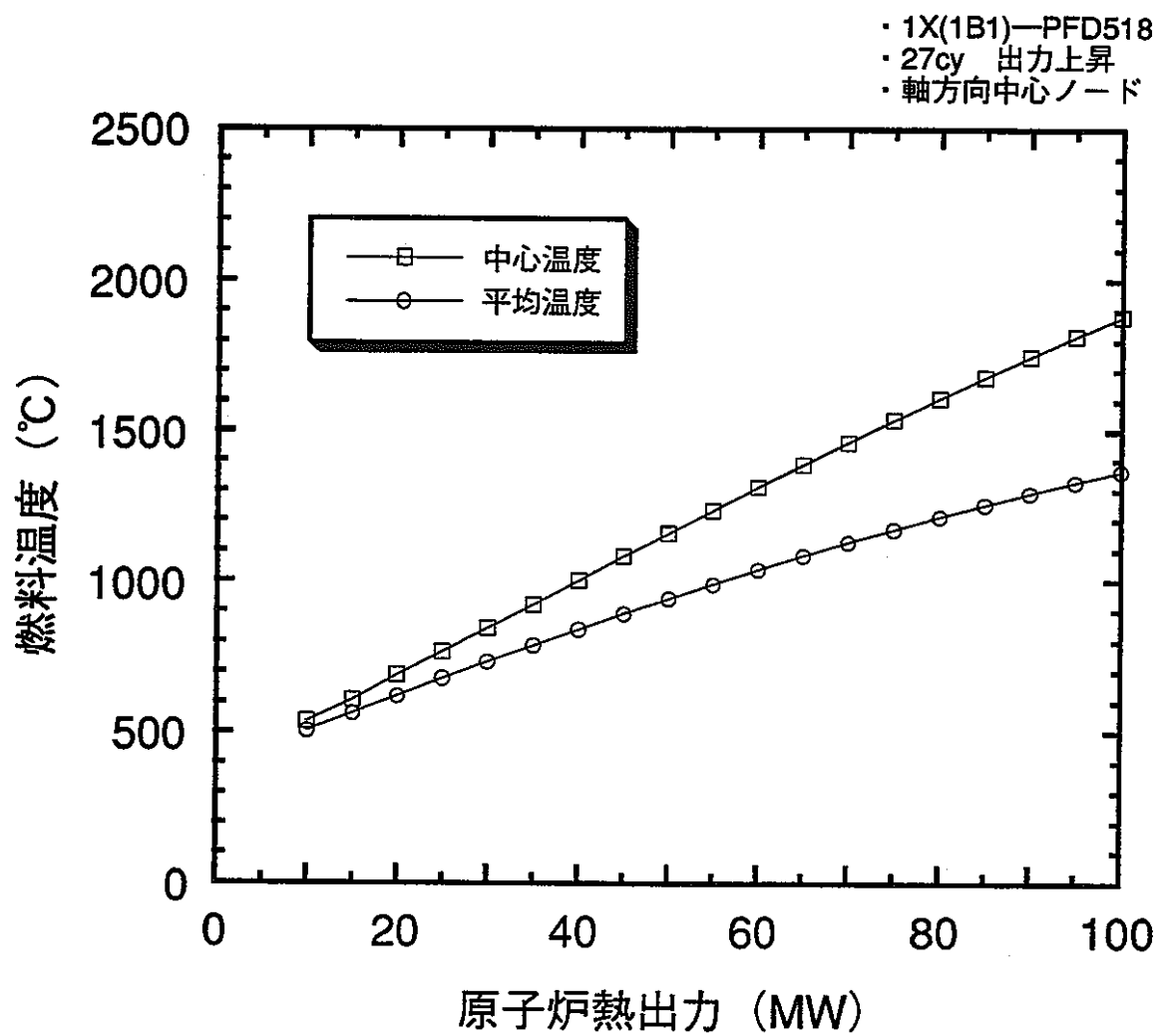


図2.5-29 第27サイクル初期出力上昇における燃料温度変化 (1B1-PFD518)

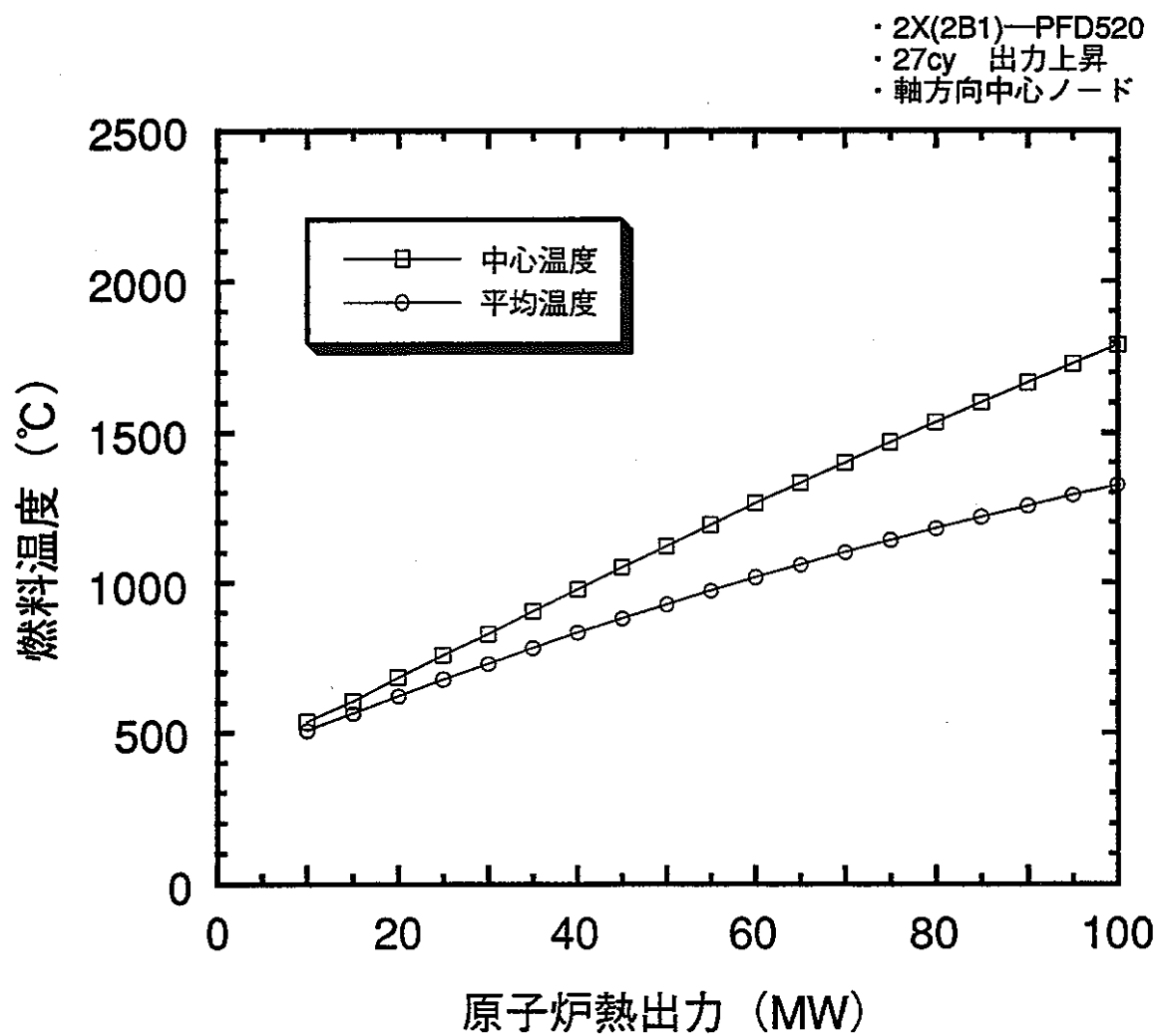


図2.5-30 第27サイクル初期出力上昇における燃料温度変化 (2B1-PFD520)

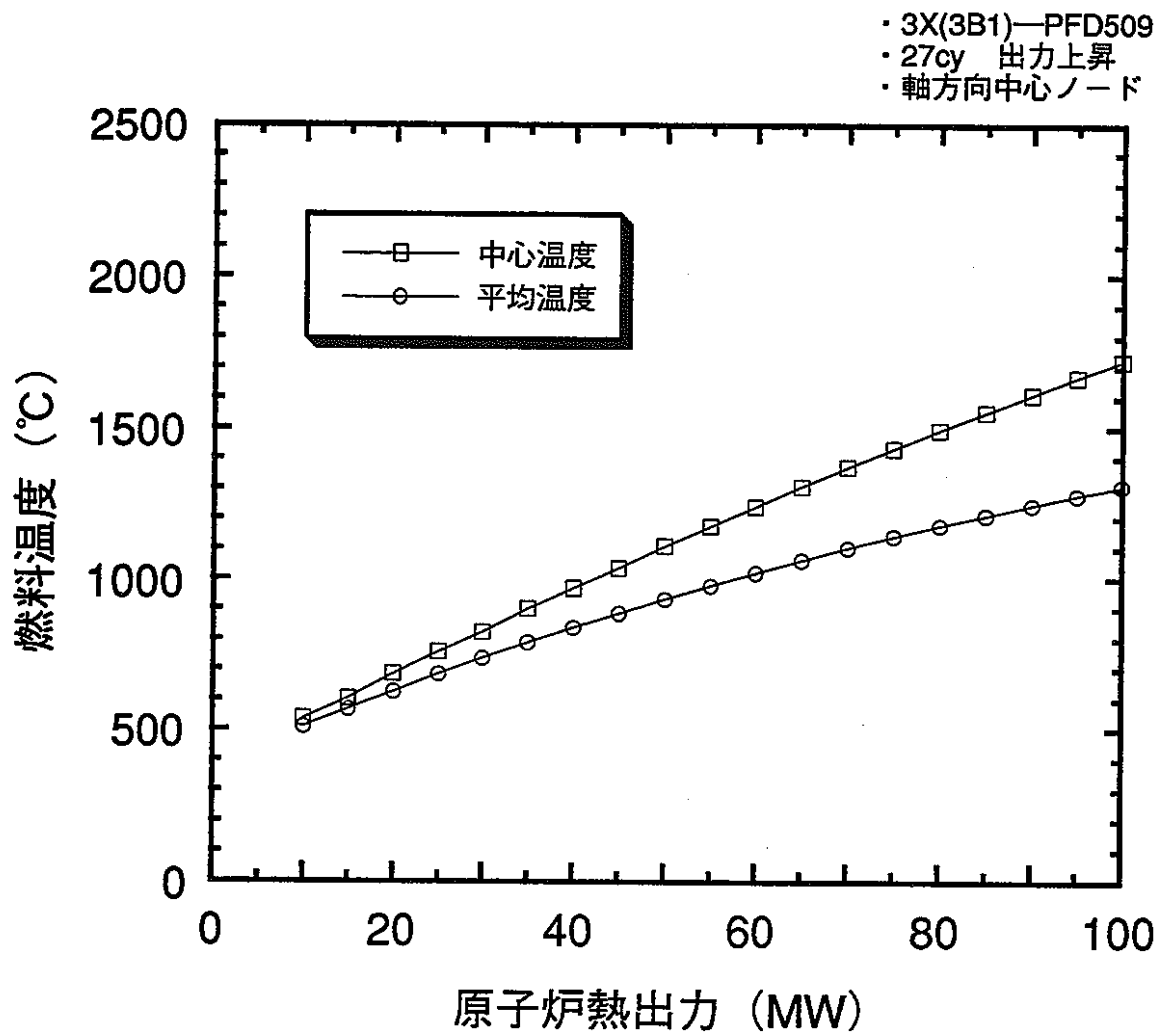


図2.5-31 第27サイクル初期出力上昇における燃料温度変化 (3B1-PFD509)

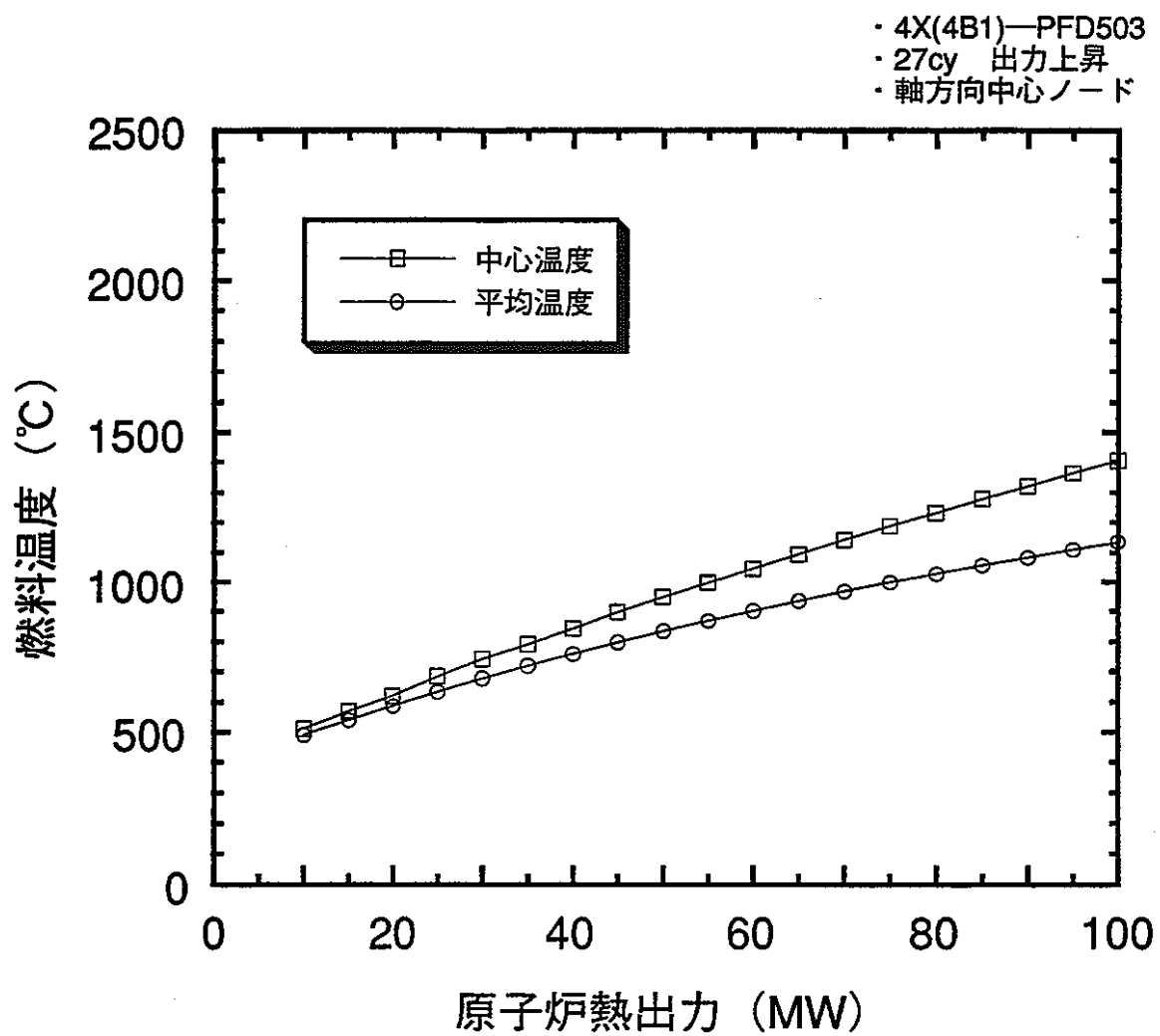


図2.5-32 第27サイクル初期出力上昇における燃料温度変化 (4B1-PFD503)

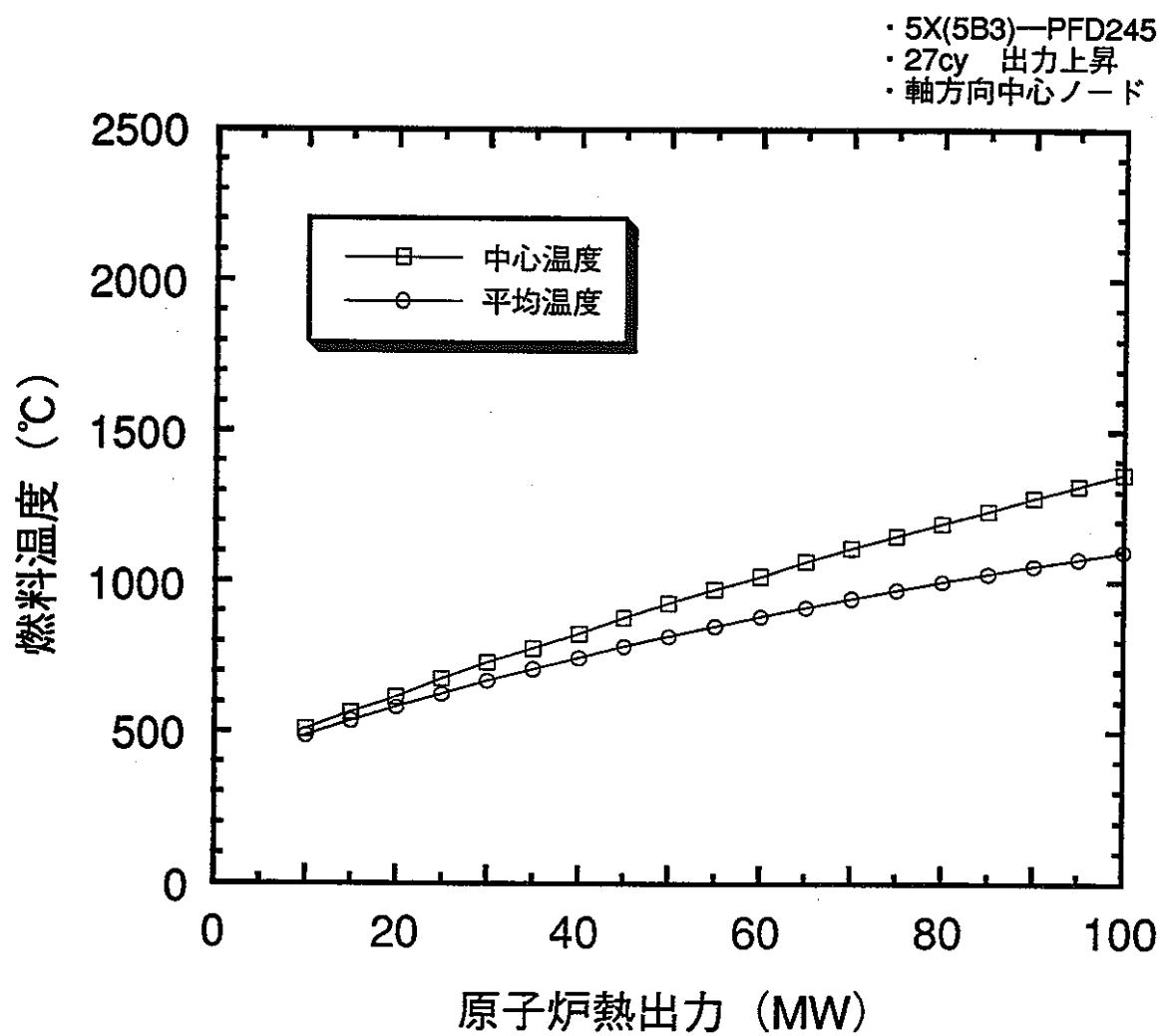


図2.5-33 第27サイクル初期出力上昇における燃料温度変化 (5B3-PFD245)

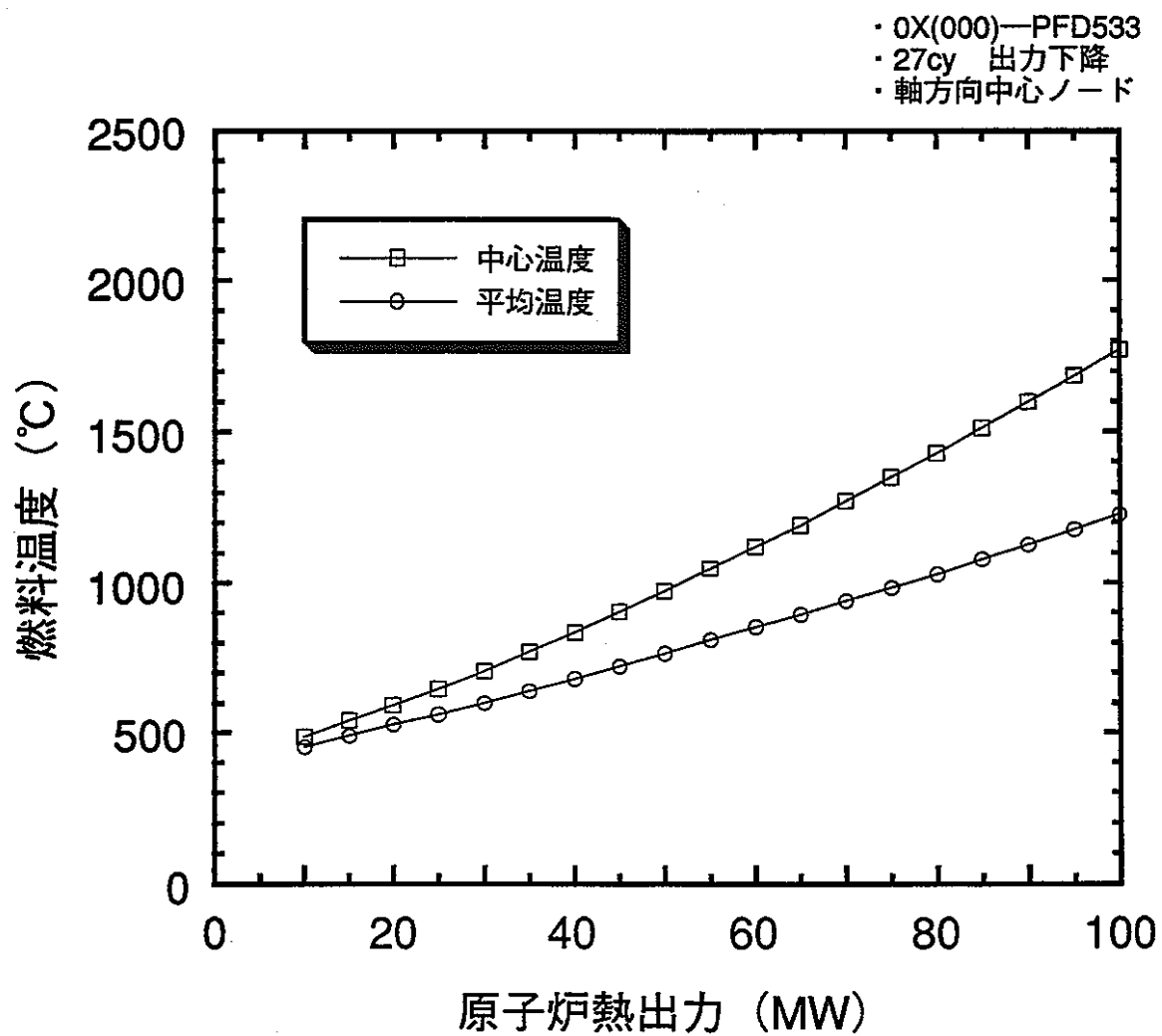


図2.5-34 第27サイクル末期出力下降における燃料温度変化 (000-PFD533)

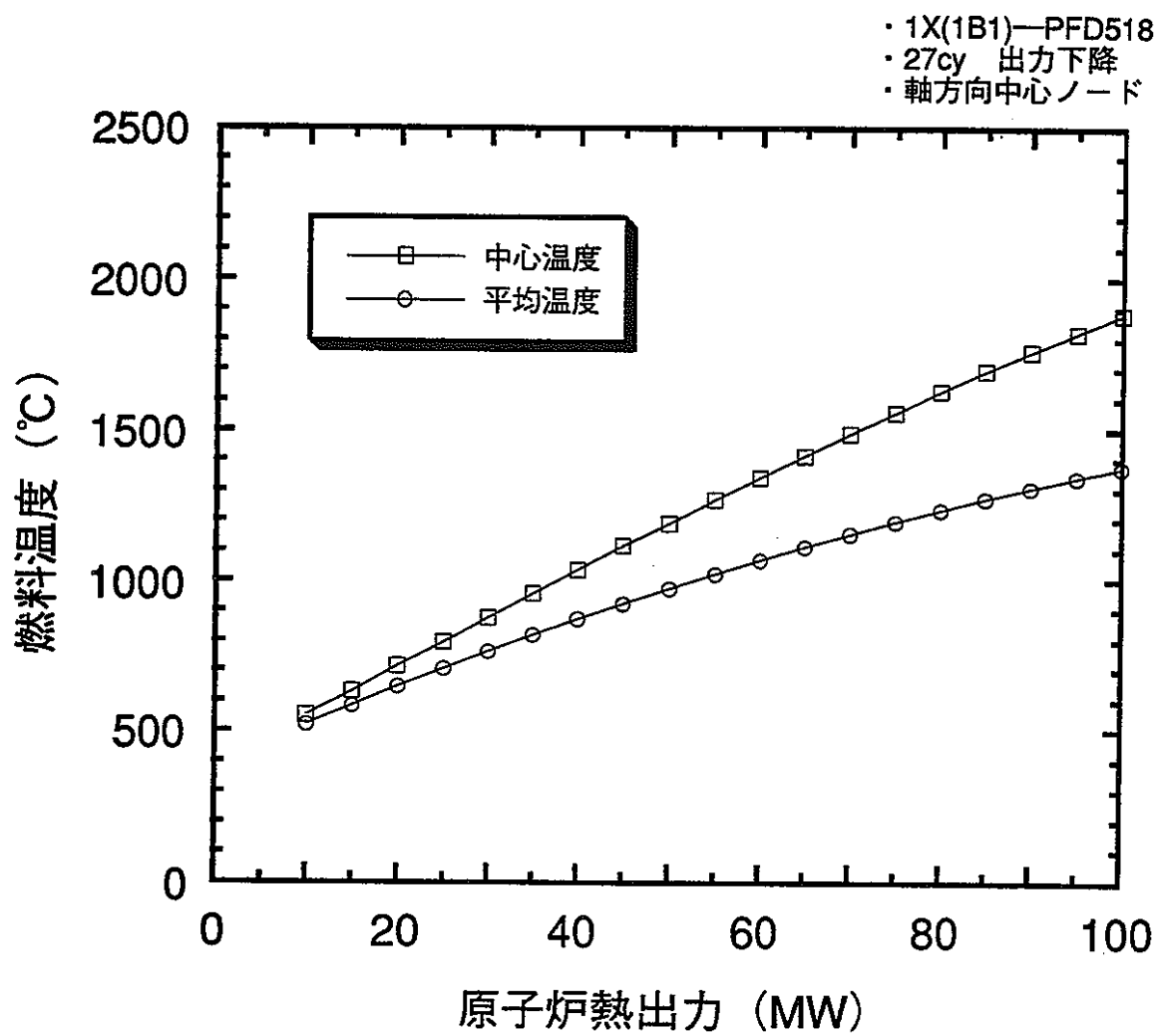


図2.5-35 第27サイクル末期出力下降における燃料温度変化 (1B1-PFD518)

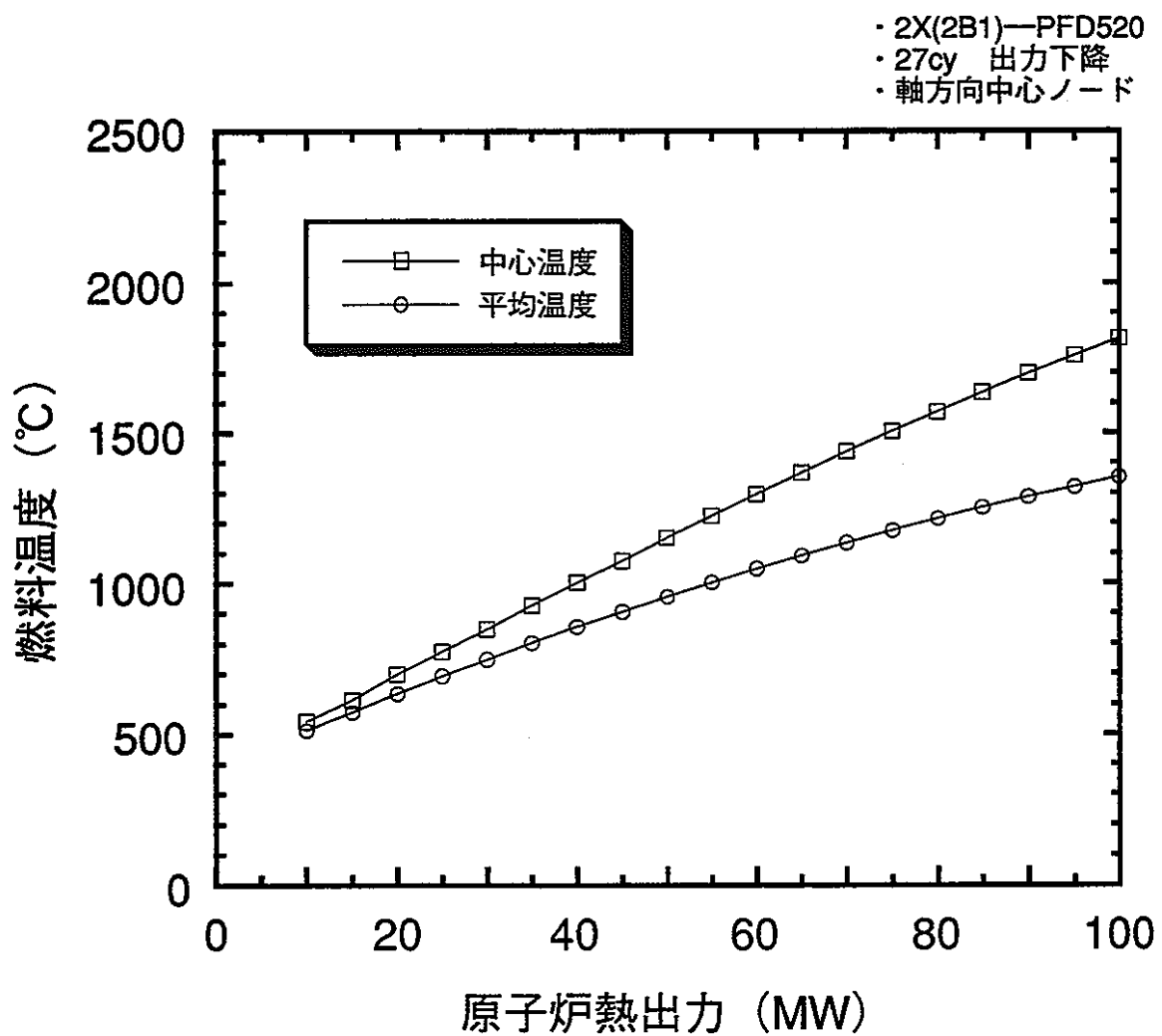


図2.5-36 第27サイクル末期出力下降における燃料温度変化 (2B1-PFD520)

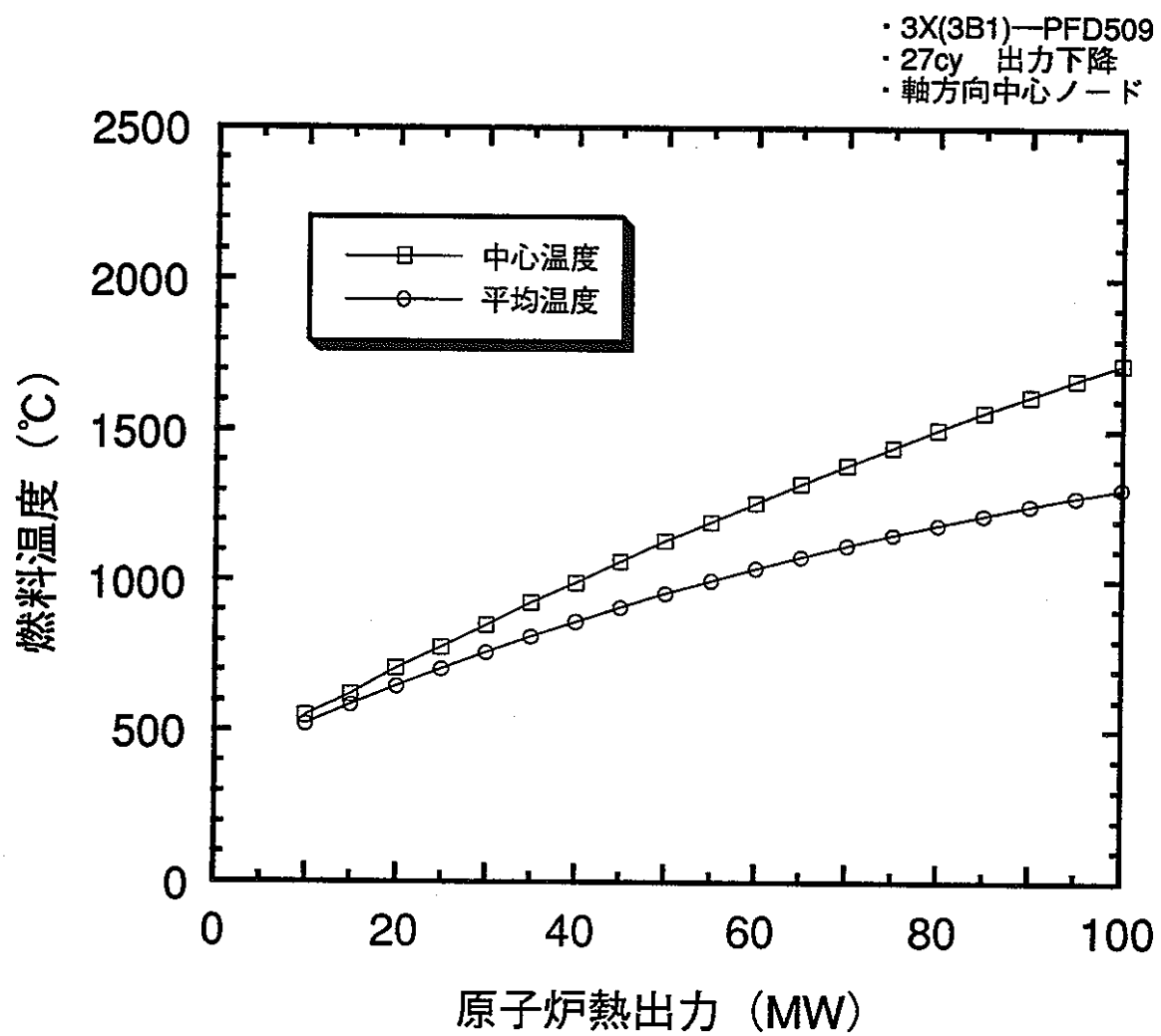


図2.5-37 第27サイクル末期出力下降における燃料温度変化 (3B1-PFD509)

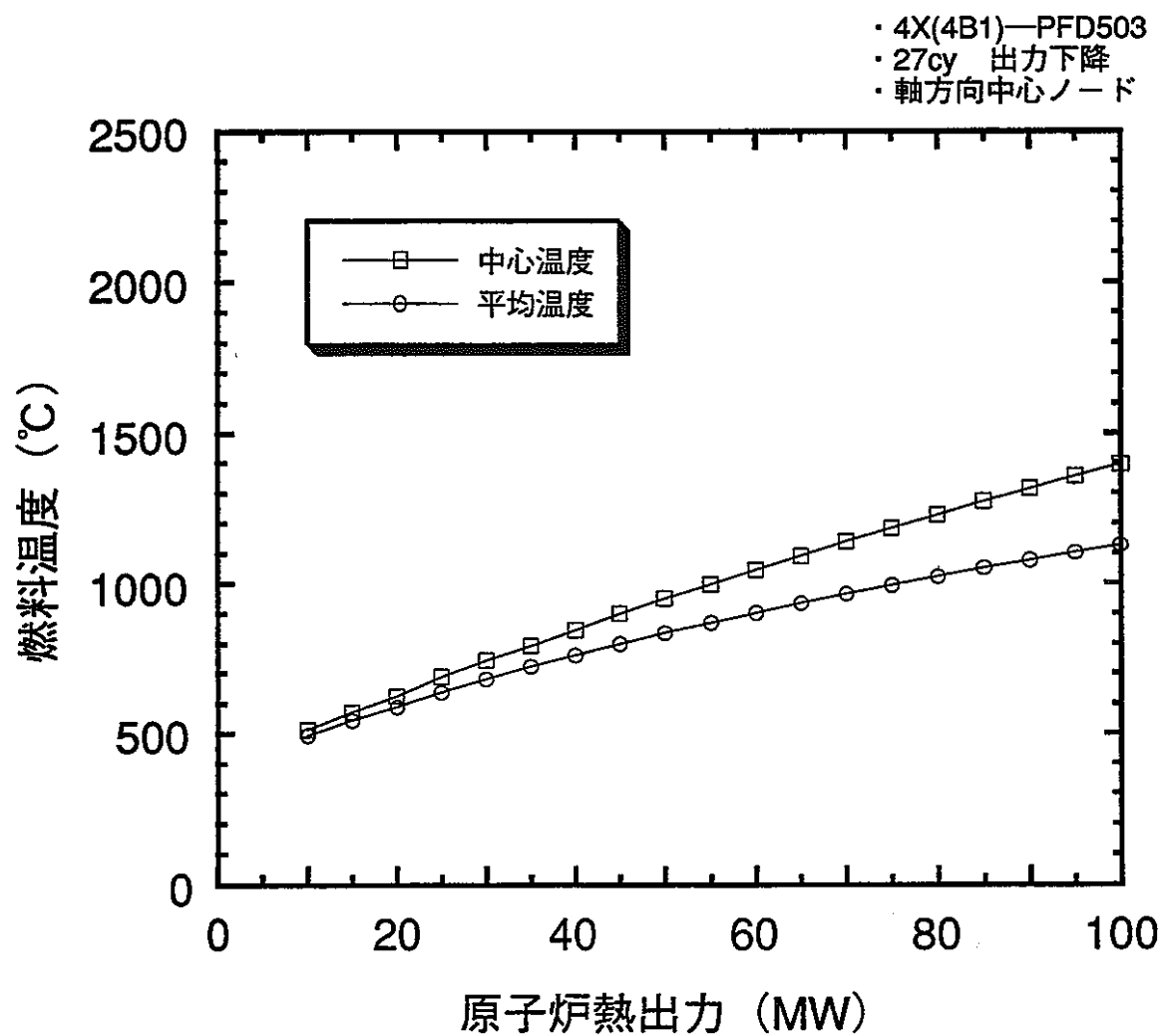


図2.5-38 第27サイクル末期出力下降における燃料温度変化 (4B1-PFD503)

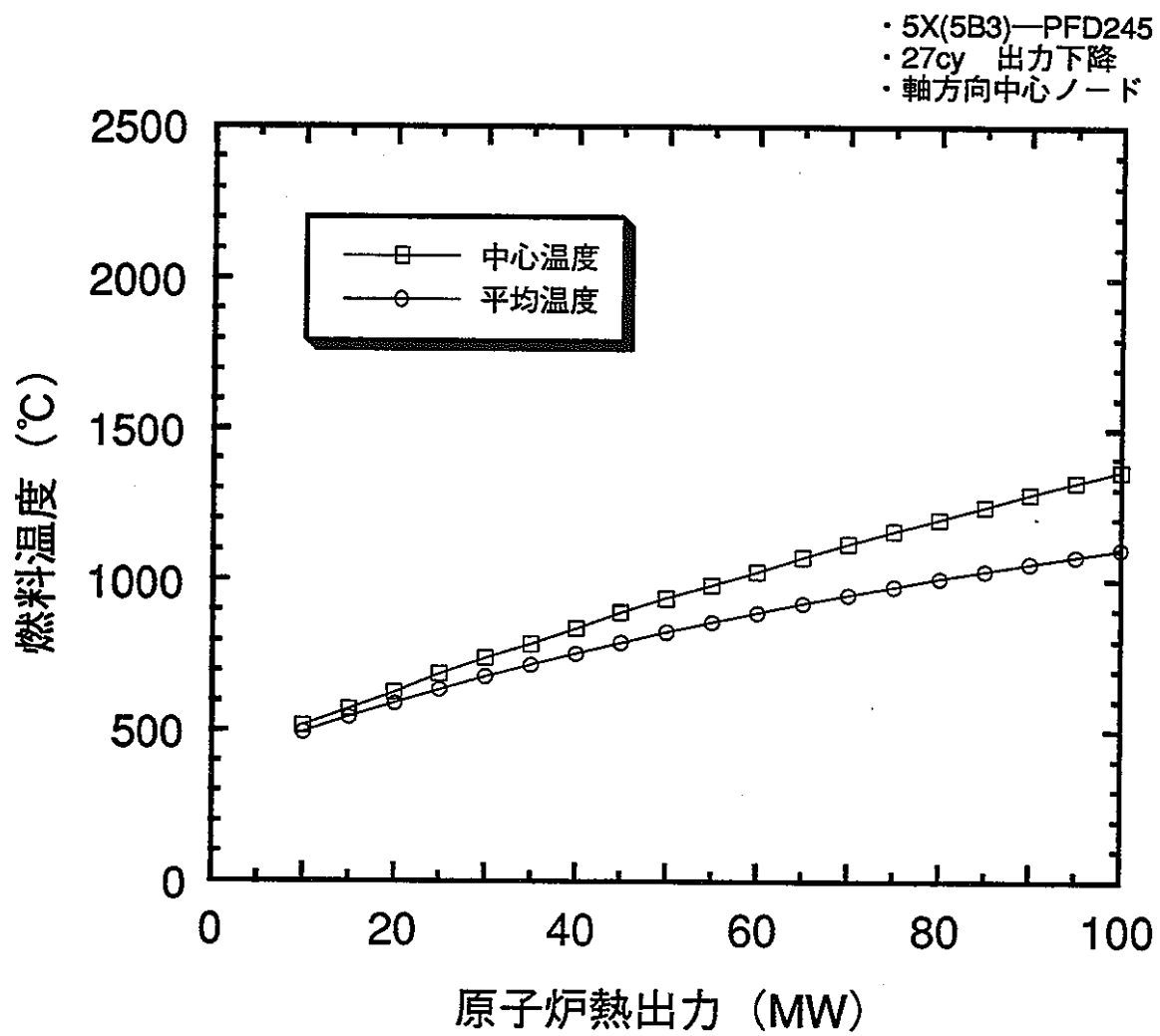


図2.5-39 第27サイクル末期出力下降における燃料温度変化 (5B3-PFD245)

2.6 出力係数評価

2.6.1 解析方法

1) 出力係数計算式

出力係数は、「2.2 反応度係数評価」と「2.5 温度評価」から得られた反応度係数および各部温度から計算した。出力係数の計算方法は「2.3 等温係数評価」と同様の手法である。

2) 各部温度

炉心燃料集合体及び特殊燃料集合体の燃料高さ相当部の燃料温度、被覆管温度及び冷却材温度については、燃料挙動解析から得られた出力変化に対する温度変化を使用した。

その他の各部温度については、推定した温度を表2.6-1に示す。インシュレータペレット部の温度については、燃料挙動解析から得られた炉心燃料部の上端および下端の平均温度から推定した。また、反射体、制御棒等については、原子炉出入口温度（500/370℃）から推定した。

3) 燃料ペレットの軸方向膨張モデル

燃料の軸方向への熱膨張は、燃料再配置等の複雑なモデルは考慮できないので、下記に示す簡易モデルで評価する。この膨張モデルは、「常陽」MK-I性能試験結果の核的重要事項の詳細解析（SJ 201 81-19）の出力係数の解析で使用したモデルと同一である。また、燃料ペレットの軸方向膨張モデルの概念図を図2.6-1に示す。

a) モデル－A

燃料軸方向膨張を燃料ペレット平均温度で評価するケース

$$\frac{dk/kk'}{dT} = -\alpha_F(av) \frac{dk/kk'}{d\rho_F/\rho_F} + \alpha_F(av) \frac{dk/kk'}{dH/H}$$

b) モデル-B

燃料軸方向膨張を燃料ペレット中心温度で評価するケース

$$\frac{dk/kk'}{dT} = -\alpha_F^* \frac{dk/kk'}{d\rho_F/\rho_F} + \alpha_F(\text{peak}) \frac{dk/kk'}{dH/H}$$

$$\alpha_F^* = f\alpha_F(\text{peak}) + (1-f)\alpha_F(\text{av})$$

f は、モデル-B における実質的な密度減少の補正係数である。

4) 燃料と制御棒の相対変位モデル

燃料と制御棒の相対変位のモデルを図2.6-2 に示す。

従って、燃料と制御棒の相対変位による反応度は、図2.6-3 から下記に示すとおりである。

a) 第0サイクル出力上昇試験時

$$\text{制御棒反応度価値} = 15.1\% \Delta k/kk' \quad (\text{PNC SN941 83-92 P-24})$$

$$\text{反応度} = 15.1 \times (0.155 - 0.085) \div 5$$

$$= \text{約} 0.21\% \Delta k/kk' / \text{cm}$$

b) 第27サイクル出力上昇試験時

$$\text{制御棒反応度価値} = 10.3\% \Delta k/kk' \quad (\text{技-4-307})$$

$$\text{反応度} = 10.3 \times (0.155 - 0.085) \div 5$$

$$= \text{約} 0.14\% \Delta k/kk' / \text{cm}$$

5) 原子炉容器と制御棒の相対変位モデル

原子炉容器と制御棒の相対変位のモデルを図2.6-4 に示す。また、評価条件は下記のとおりである。制御棒は部分挿入状態を模擬している。

a) CRDL 実効長さ 410cm (上部280cm+下部130cm)

b) 炉容器代表長さ 580cm (上部280cm+下部300cm)

c) 各部温度 (°C)

原子炉出入口温度から推定した各部の平均温度を下記に示す。

	C R D L		炉容器	
	上部	下部	上部	下部
0%出力	370	370	370	370
100%出力	500	380	500	435

上記条件から、下部のみが対象となり、炉容器と制御棒の伸びは下記のとおりである。

$$\begin{array}{lcl}
 \text{炉容器の伸び} & 302.25(100\%) - 301.87(0\%) & = 0.38\text{cm} \\
 \text{制御棒の伸び} & 130.84(100\%) - 130.81(0\%) & = 0.03\text{cm} \\
 \text{差} & & 0.35\text{cm}
 \end{array}$$

従って、炉容器と制御棒の相対変位の反応度は、下記に示すとおりである。

a) 第0サイクル出力上昇試験時

$$\begin{aligned}
 \text{反応度} &= (0.35 \times 0.21) \div 100 \\
 &= \text{約} 7.4 \times 10^{-4} \% \Delta k / k k' / \text{MW}
 \end{aligned}$$

b) 第27サイクル出力上昇試験時

$$\begin{aligned}
 \text{反応度} &= (0.35 \times 0.14) \div 100 \\
 &= \text{約} 4.9 \times 10^{-4} \% \Delta k / k k' / \text{MW}
 \end{aligned}$$

2.6.2 解析結果

第0サイクル出力上昇試験時における出力係数の測定結果と解析結果の比較を図2.6-5～図2.6-16に示す。同図には、(1) 相対変位を考慮していない場合、(2) 燃料と制御棒の相対変位を考慮した場合、さらに、(3) 炉容器と制御棒の相対変位を考慮した場合の3種類の図が示してある。

同様に、第27サイクルの初期出力上昇および末期出力下降における出力係数の測定結果と解析結果の比較を図2.6-17および図2.6-18に示す。

第0サイクルおよび第27サイクルの測定値と解析値の比較から、次のことがいえる。

- a) 全体的に、出力係数の解析値は、絶対値で過大評価の傾向にある。特に、燃焼度が増大するにともなって、その傾向は大きくなる。
- b) 一方、出力係数の炉出力依存性の傾向は、燃料の照射履歴を考慮した燃料温度評価を出力係数に反映させることである程度再現できる。

ただし、燃焼の進んだ第27サイクル末期の出力下降時の出力係数については、解析値と測定値では炉出力依存性が逆の傾向を示している。

第0～7サイクルおよび第27サイクルの出力係数解析値の内訳を図2.6-19～図2.6-22に示す。この内訳から次のことがいえる。

- a) 出力係数の炉出力依存性は、燃料の膨張効果およびドップラー効果によるものである。すなわち、出力係数は燃料の温度変化に依存する。
- b) 未燃焼炉心の第0サイクルでは燃料膨張効果が出力の上昇とともに増大しているのに対し、平衡サイクル炉心の第27サイクルでは燃料の膨張効果はほぼ一定値である。これは、第27サイクルでは新燃料集合体が4体と少なく、出力上昇にともなう燃料温度変化が炉心全体としては小さいためである。
- c) 冷却材膨張効果および構造材膨張効果は、サイクル（炉心燃料の

燃焼度)に関係なくほぼ一定値である。

第0-7サイクルおよび第27サイクルにおける出力係数の測定値を図2.6-23に示す。また、同サイクルにおける燃料平均温度評価(モデル-A)および燃料中心温度評価(モデル-B)の解析値を図2.6-24および図2.6-25に示す。この二つのサイクルの出力係数の比較から次のことがいえる。

- a) 出力係数の炉出力依存性は、燃料軸方向膨張モデルとして燃料中心温度(モデル-B)で評価することで傾向はほぼ再現できる。
- b) ただし、燃料膨張と制御棒の相対変位および炉容器と制御棒の相対変位の評価モデルが重要といえる。従って、今後は相対変位のモデルの詳細化が重要なポイントと考える。

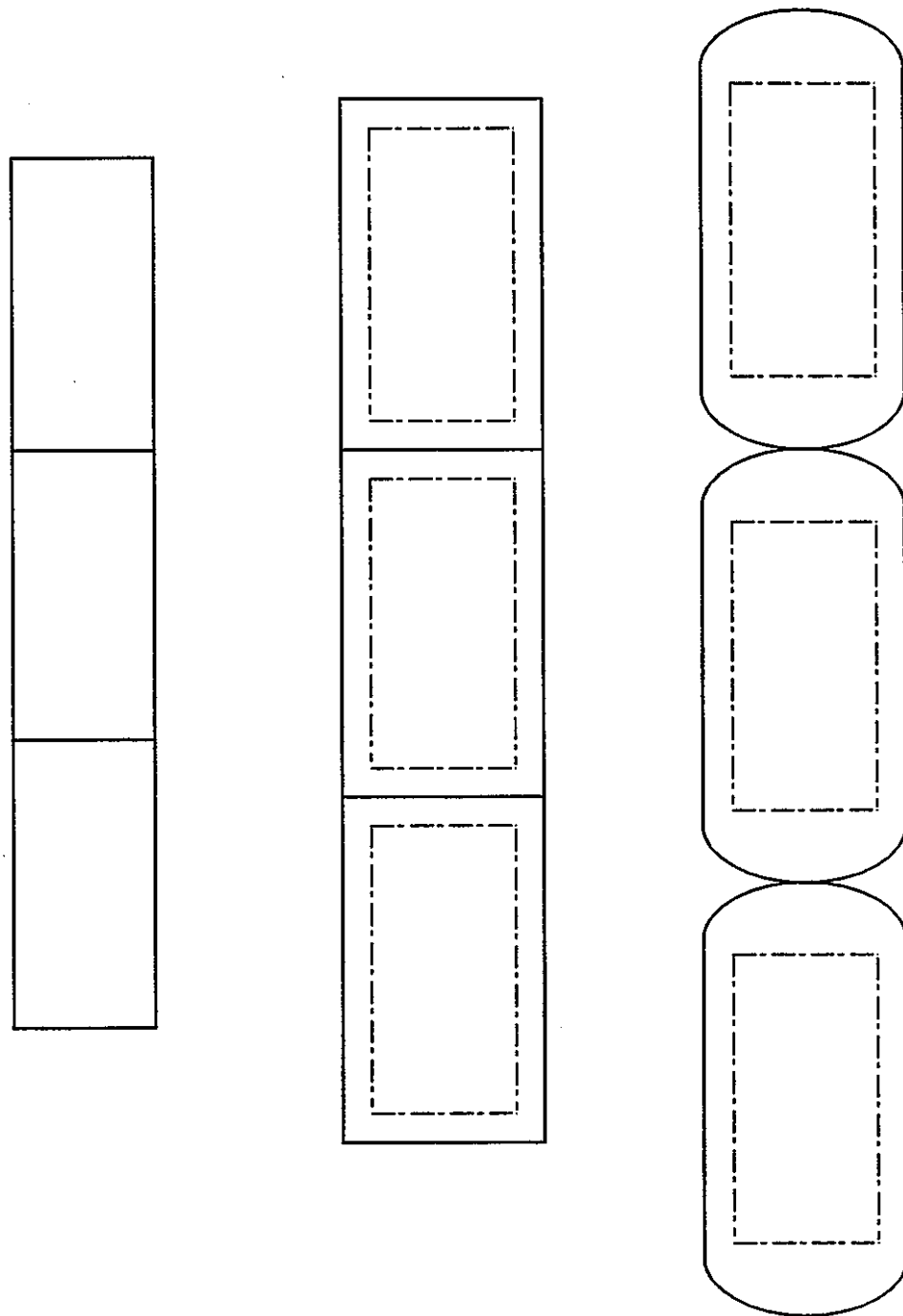
表2.6-1 100%定格出力運転時の各部温度

[単位 ;℃]

	燃料平均	燃料中心	燃料表面	被覆管	ラッパ管	冷却材	B ₄ C
特殊反射体				430	420	420	
下部インシュレータ	401	417	385	371	370	370	
上部インシュレータ	401	415	389	543	529	529	
制御棒				390	380	380	400
内側反射体				430	420	420	
外側反射体 (A)				430	420	420	
外側反射体 (B)				430	420	420	
下部遮蔽体				370	370	370	
上部遮蔽体				500	500	500	

♣ インシュレータ部の温度については、燃料挙動解析から得られた炉心燃料部の上端及び下端の平均温度から推定した。

その他の反射体、制御棒等については、原子炉出入口温度 (500/370℃) から推定した。



- 1) 膨脹前のペレット 2) 平均温度の場合の伸び (Model-A) 3) 中心温度の場合の伸び (Model-B)

図2.6-1 燃料ペレットの軸方向膨脹概念図

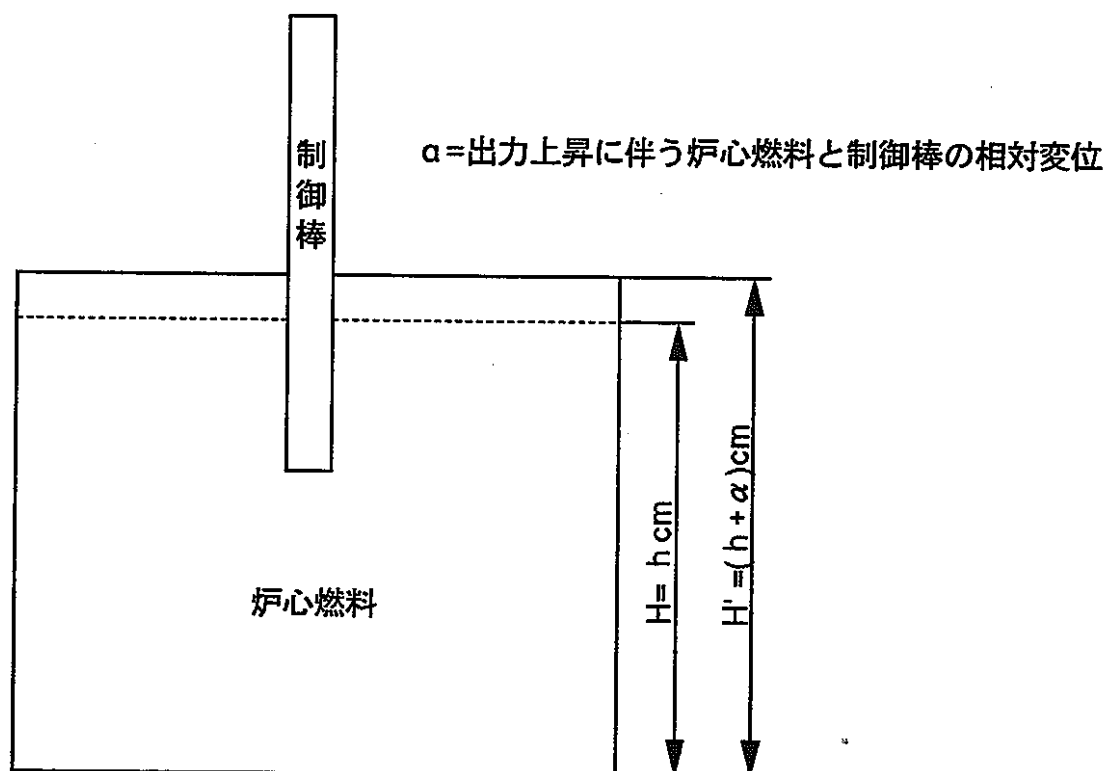


図2.6-2 燃料と制御棒の相対変位モデル

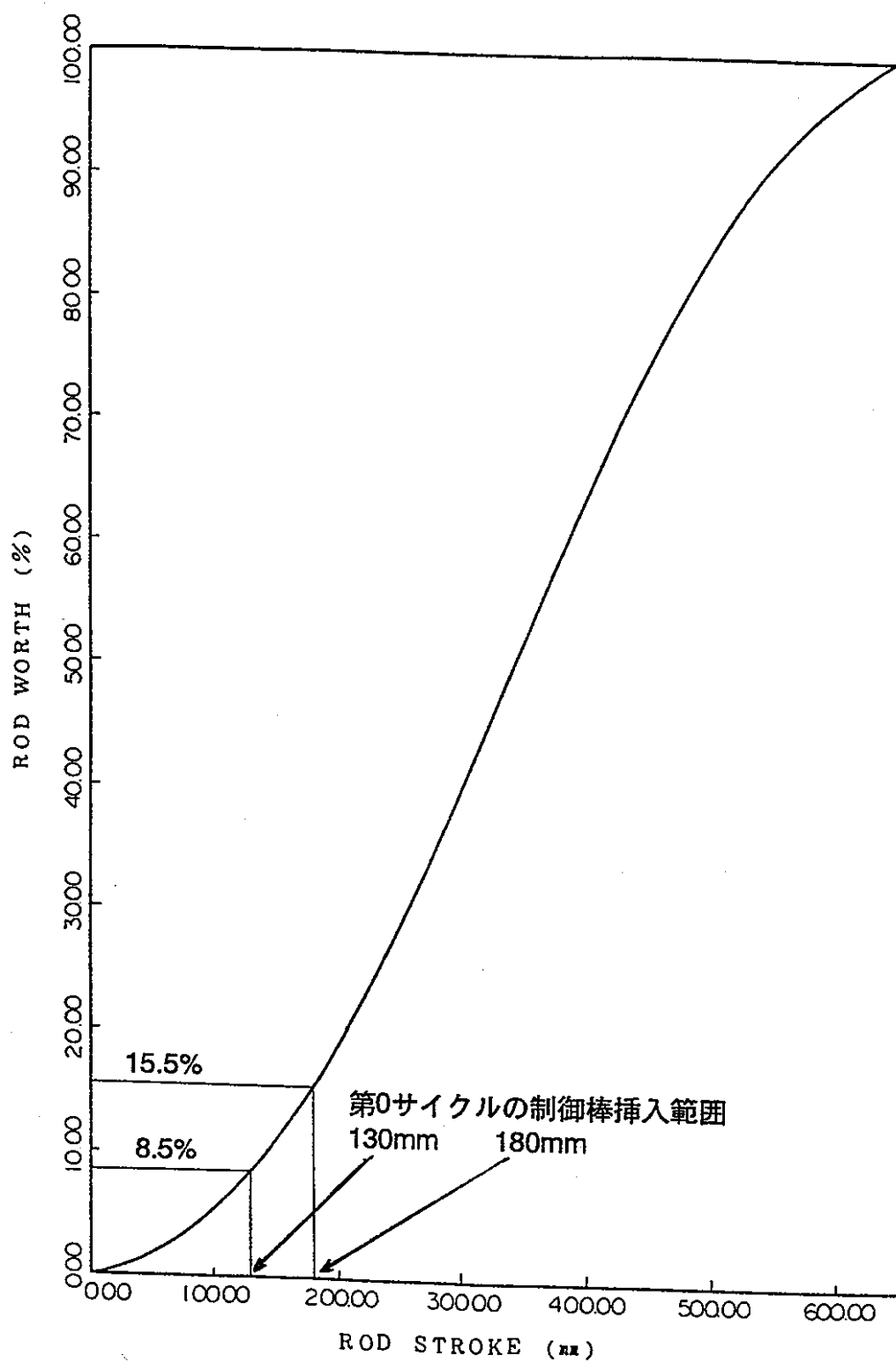


図2.6-3 第0サイクル出力上昇試験時の制御棒ストローク曲線

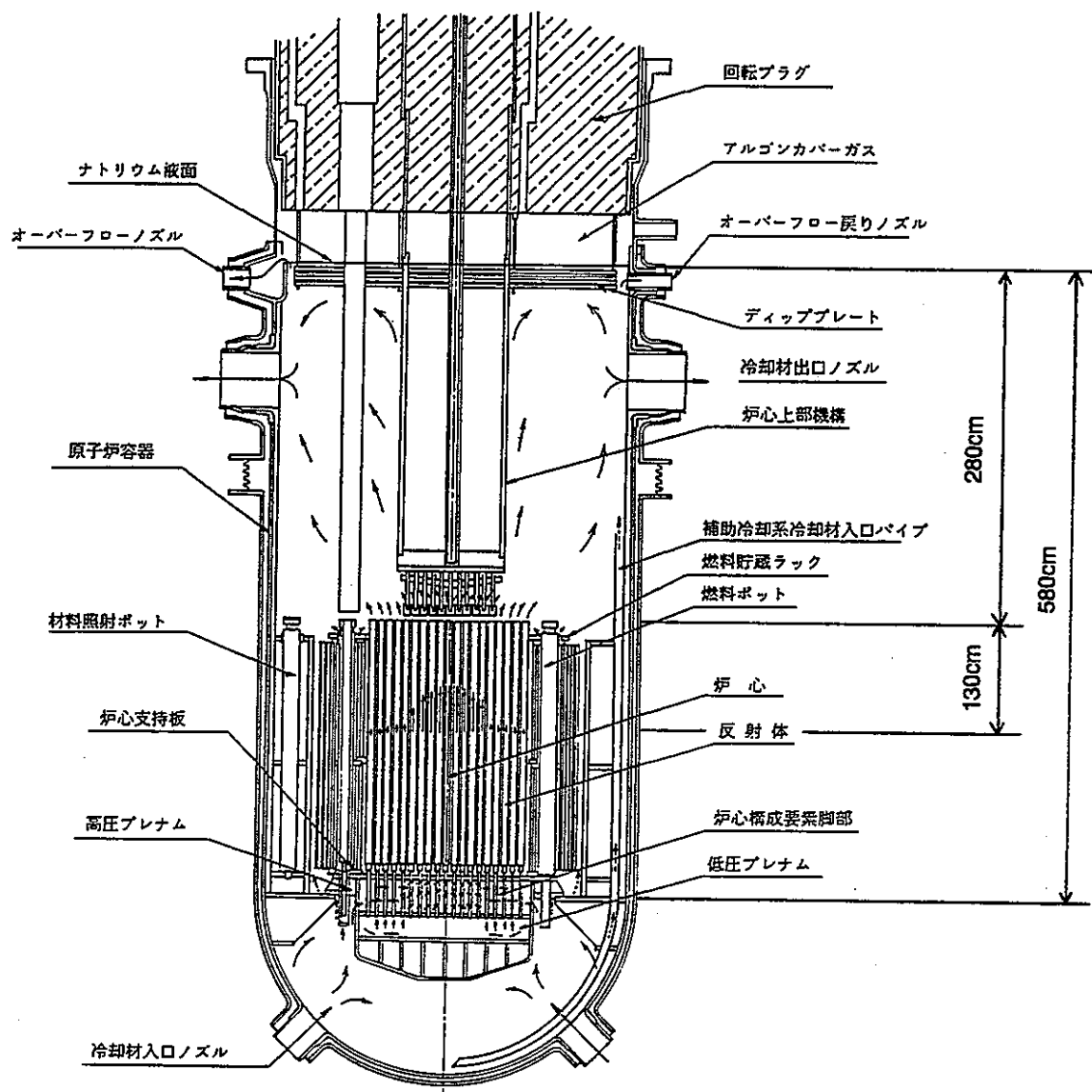


図2.6-4 制御棒と炉容器代表長さ

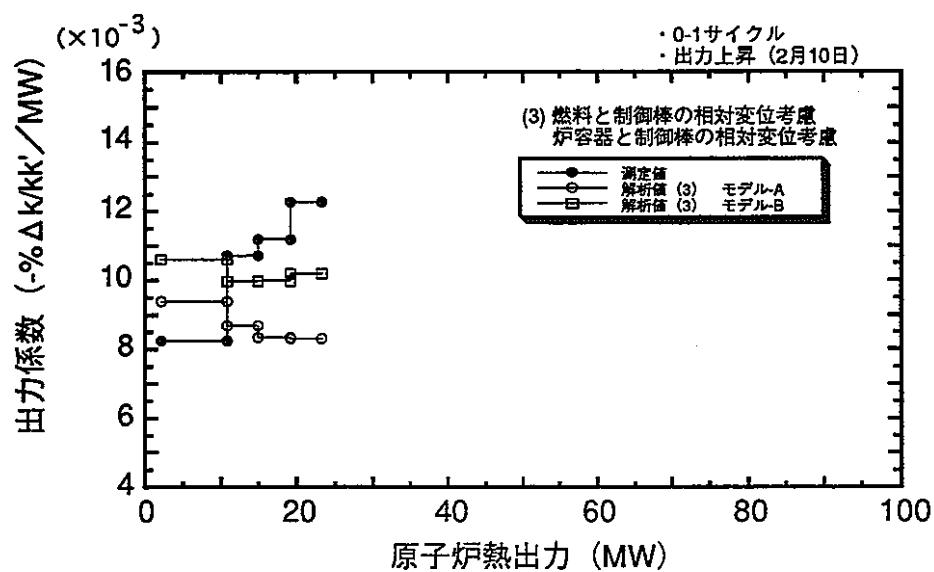
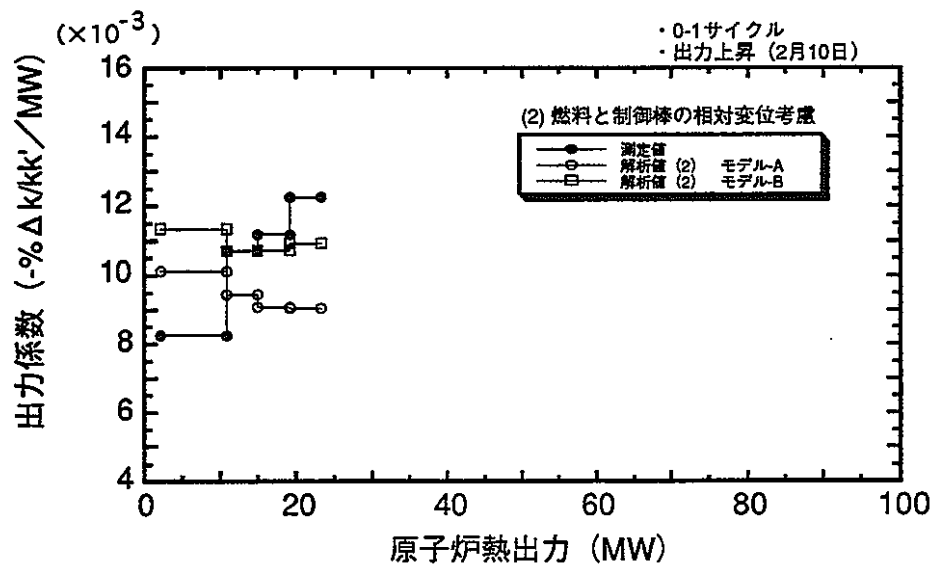
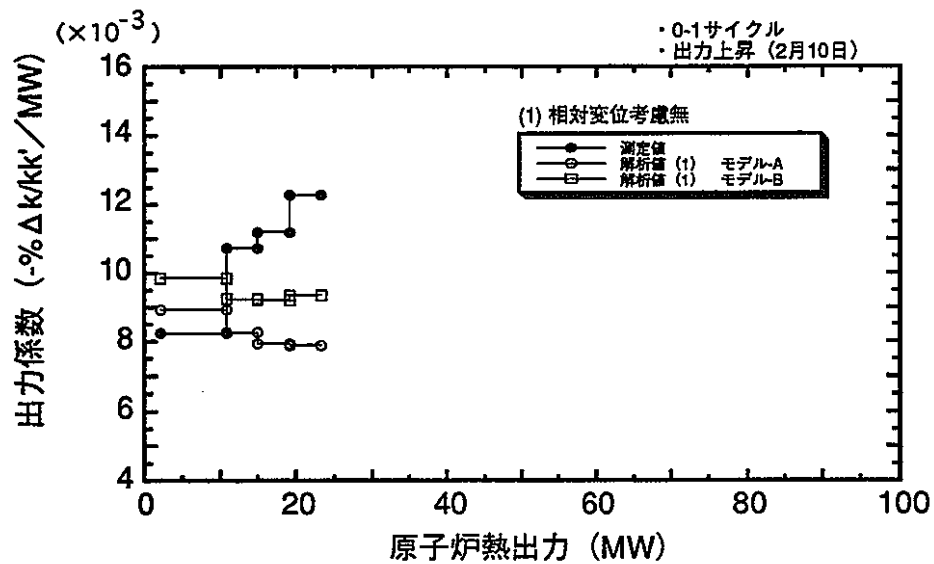


図2.6-5 第0-1サイクル出力上昇における出力係数の測定値と解析値の比較

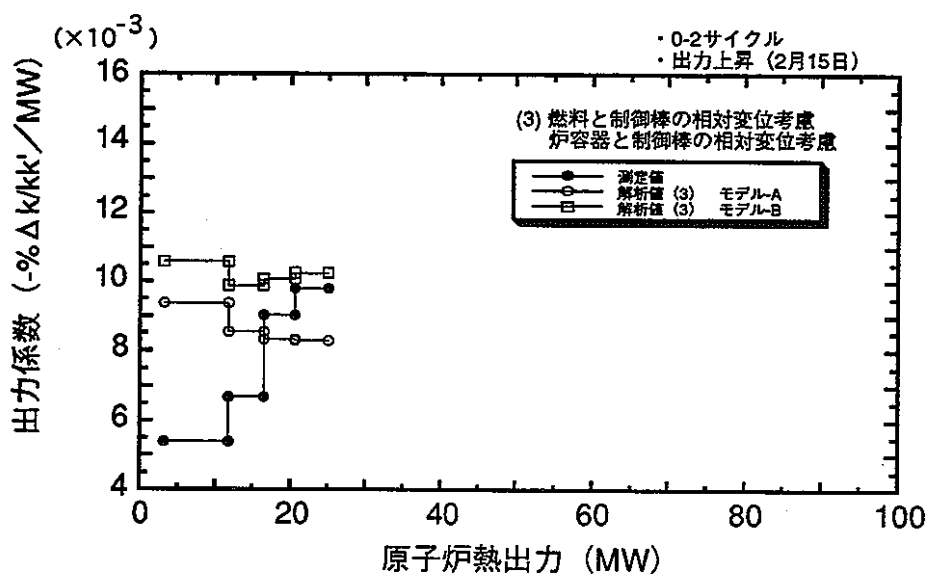
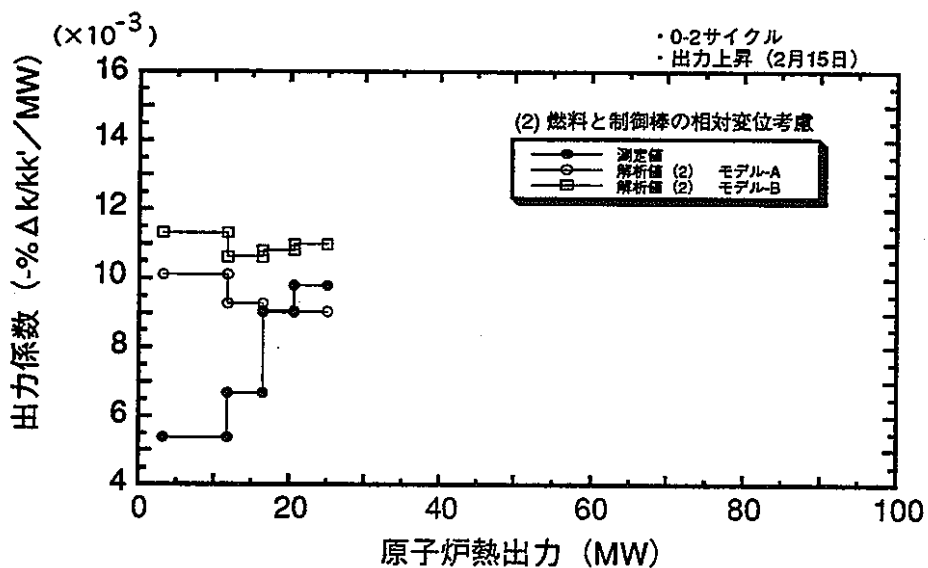
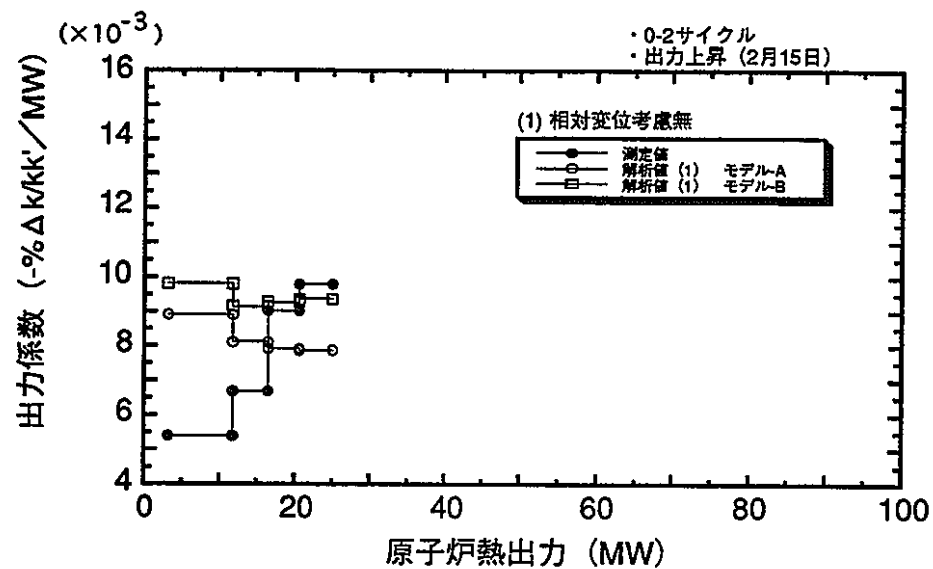


図2.6-6 第0-2サイクル出力上昇における出力係数の測定値と解析値の比較

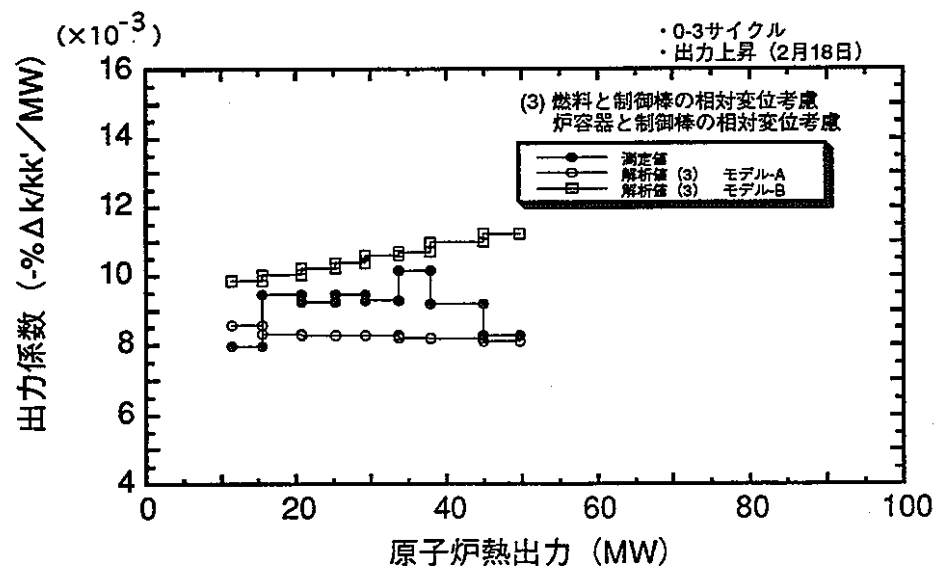
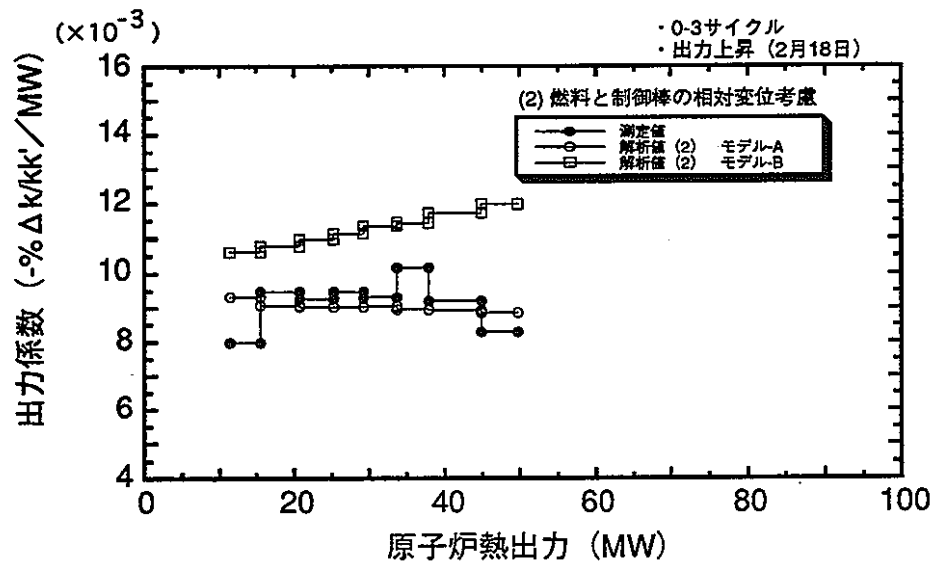
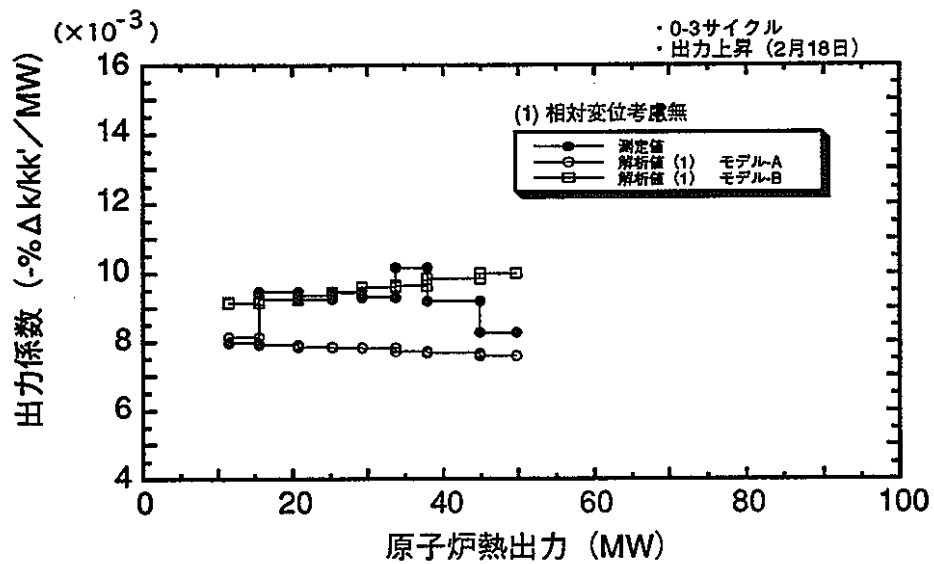


図2.6-7 第0-3サイクル出力上昇における出力係数の測定値と解析値の比較

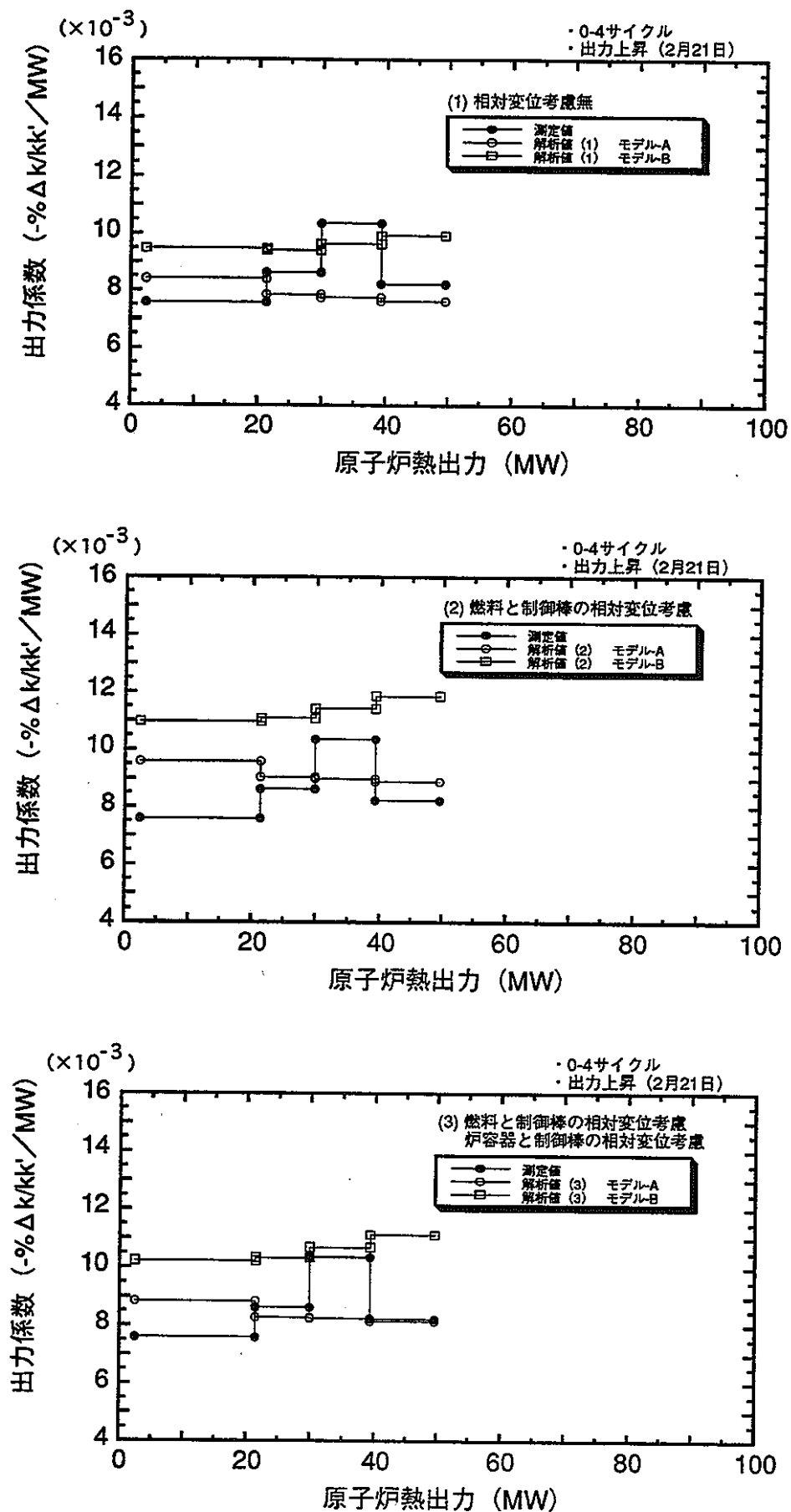


図2.6-8 第0-4サイクル出力上昇における出力係数の測定値と解析値の比較

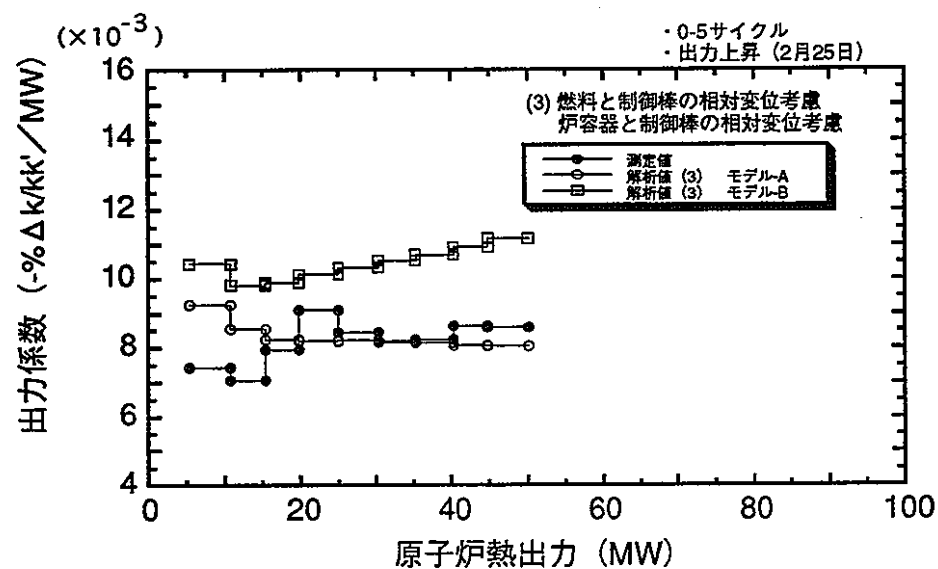
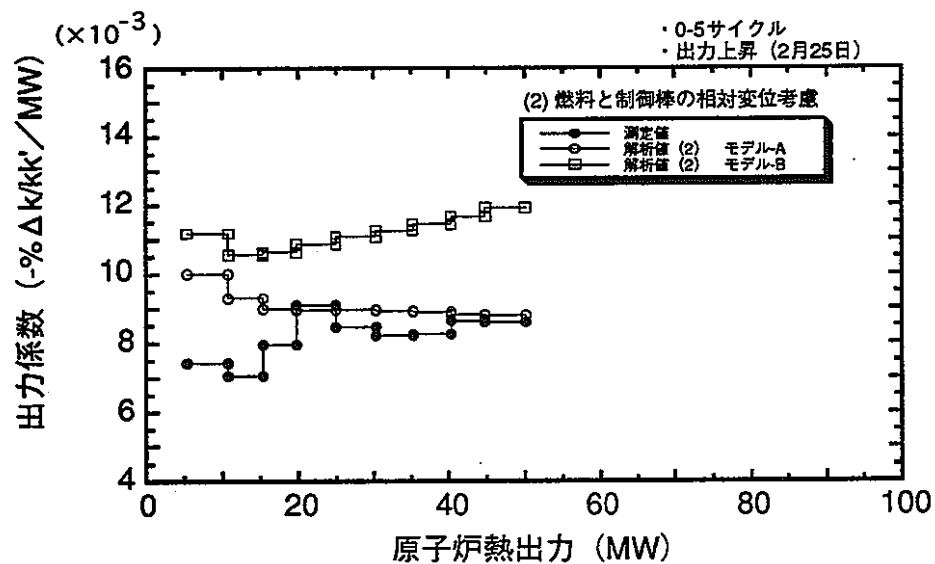
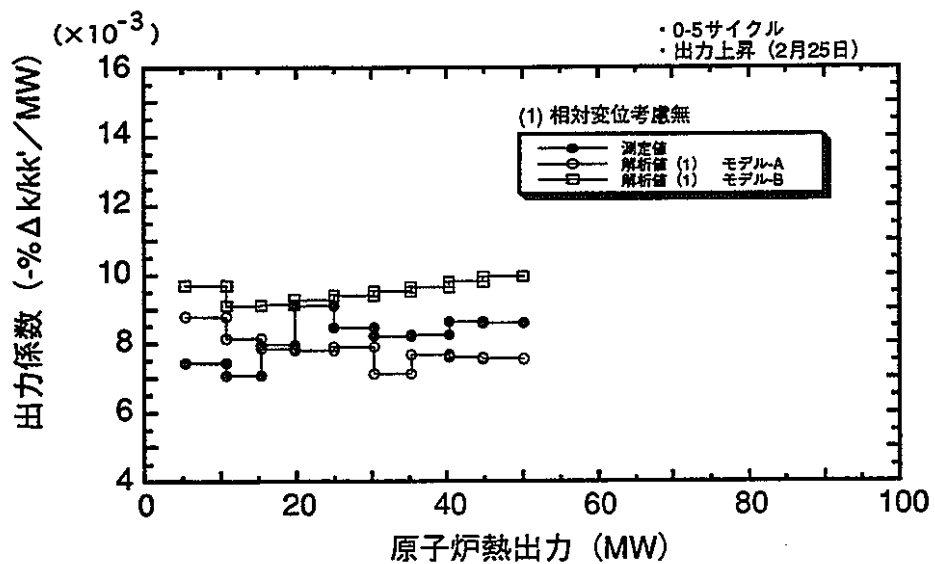


図2.6-9 第0-5サイクル出力上昇における出力係数の測定値と解析値の比較

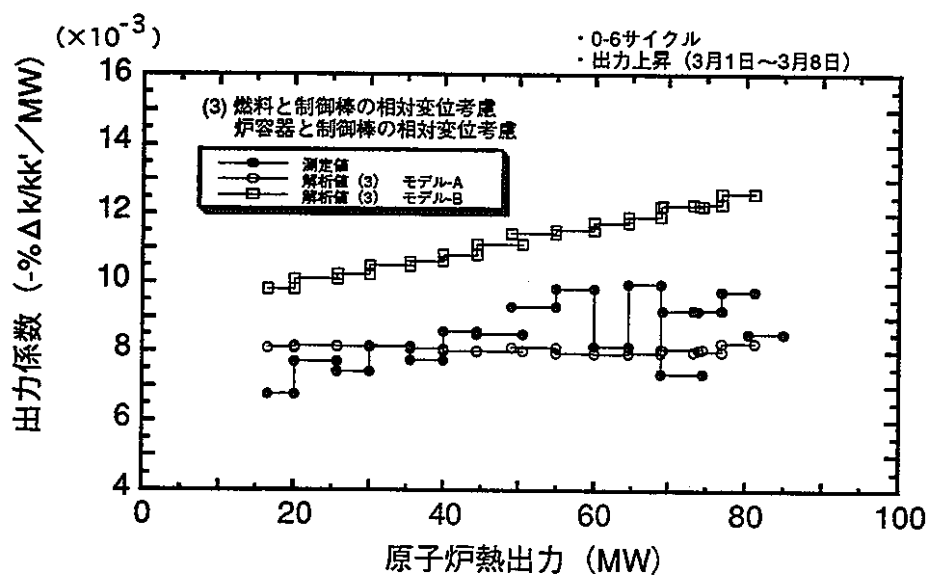
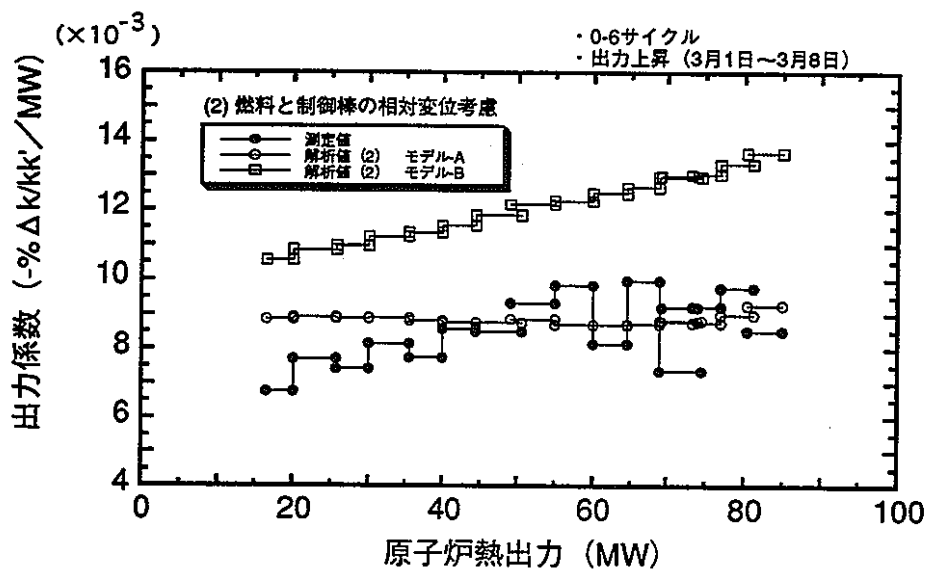
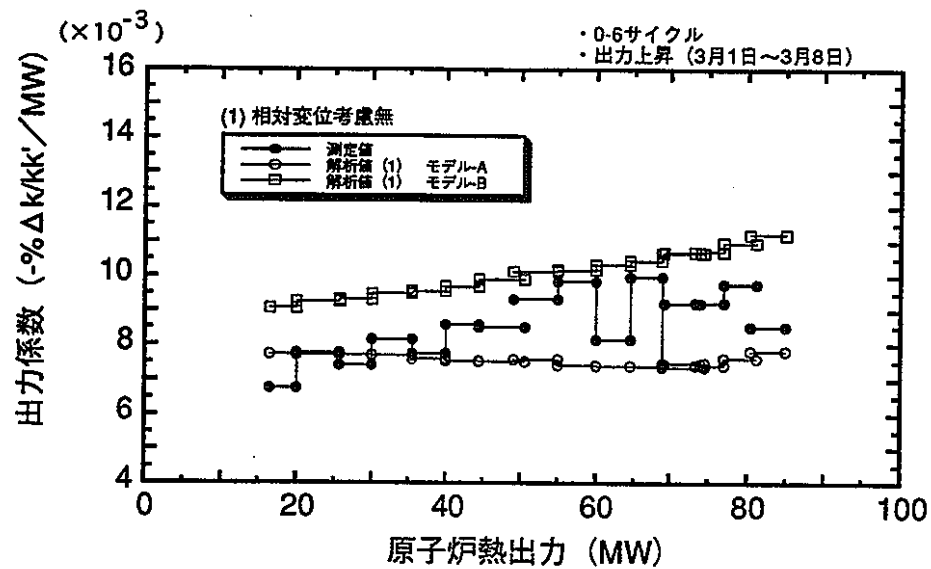


図2.6-10 第0-6サイクル出力上昇における出力係数の測定値と解析値の比較

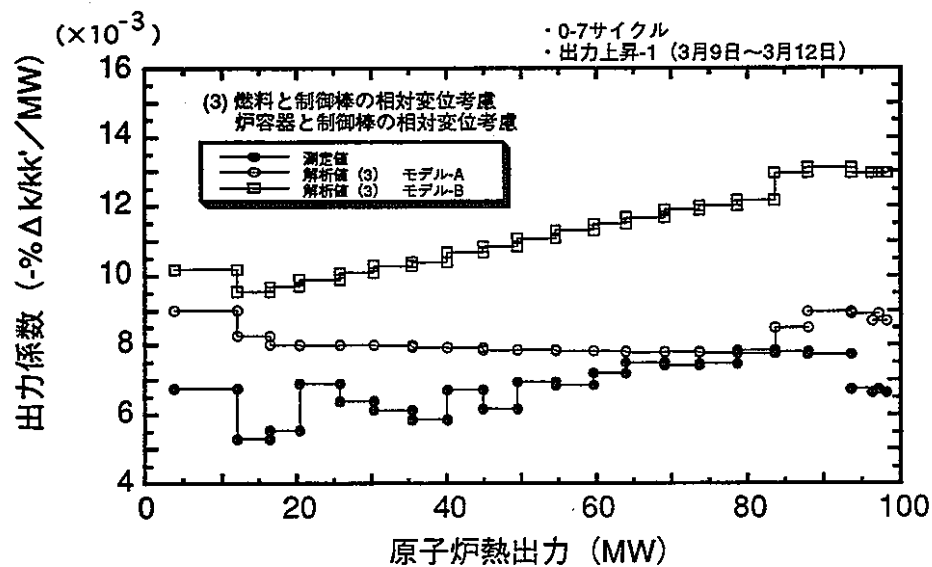
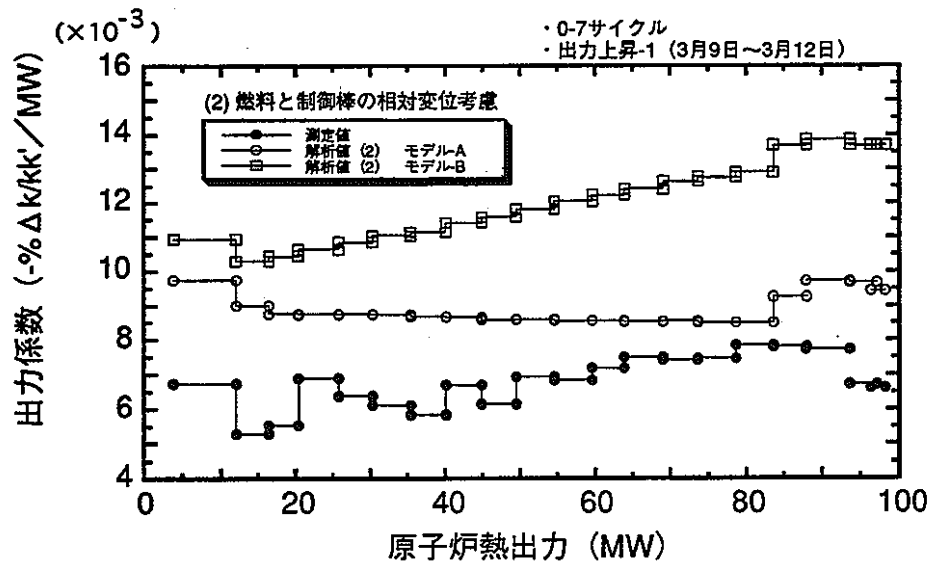
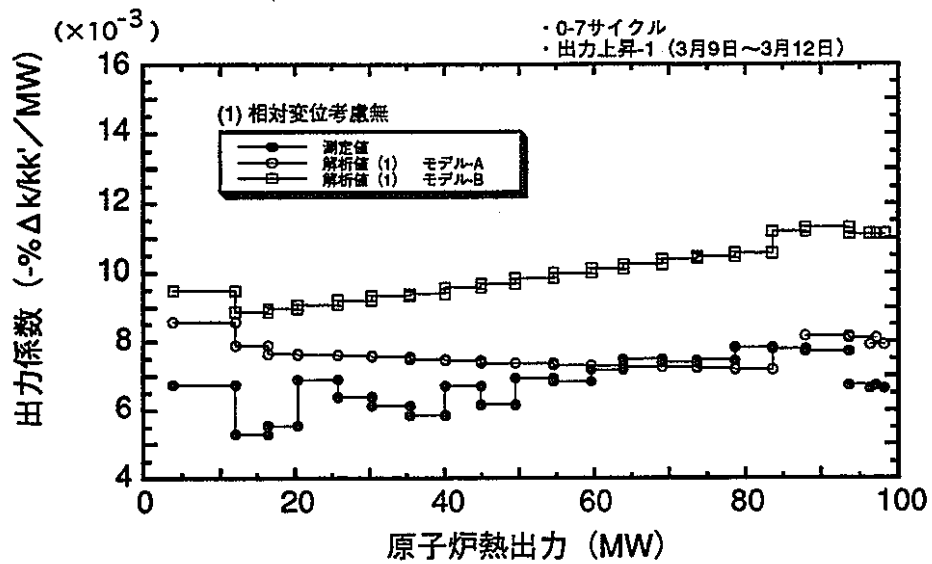


図2.6-11 第0-7サイクル出力上昇(1)における出力係数の測定値と解析値の比較

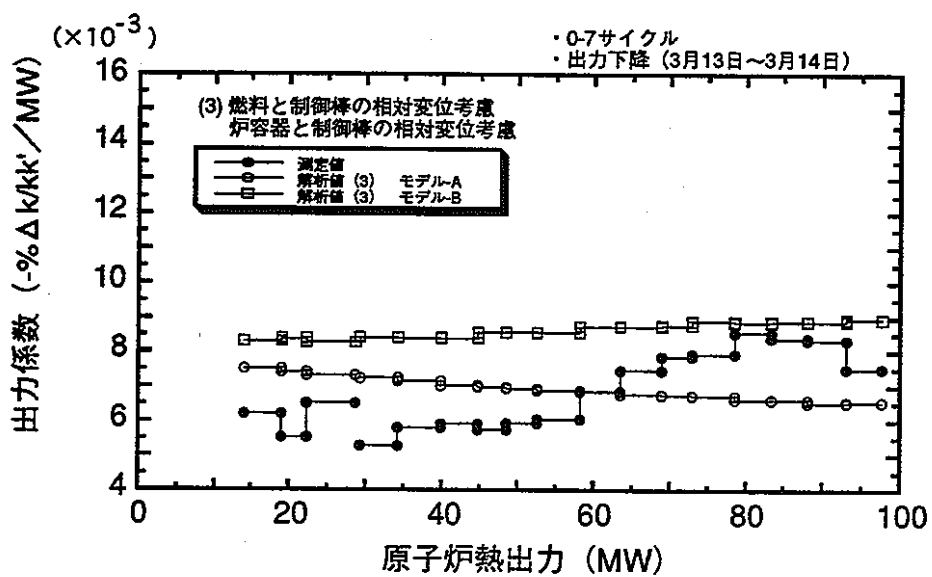
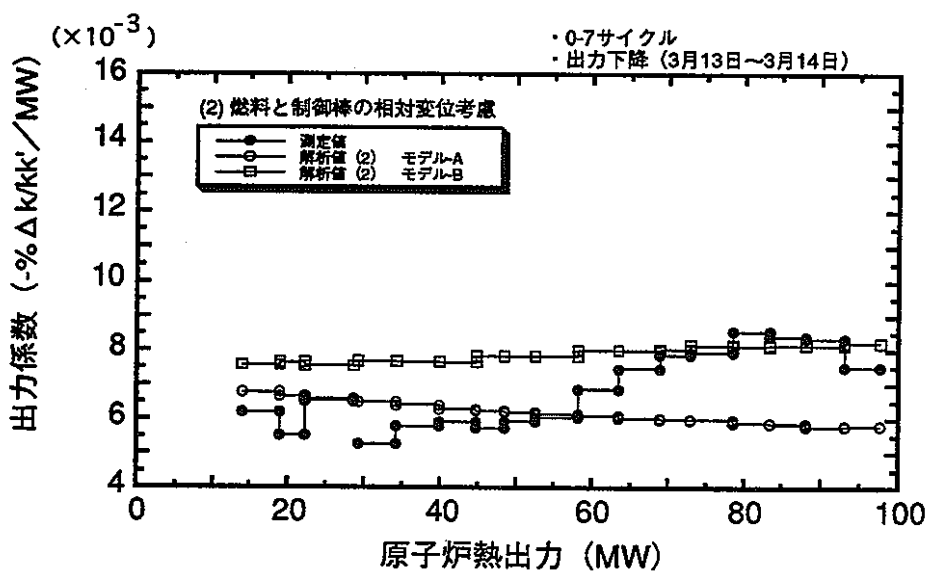
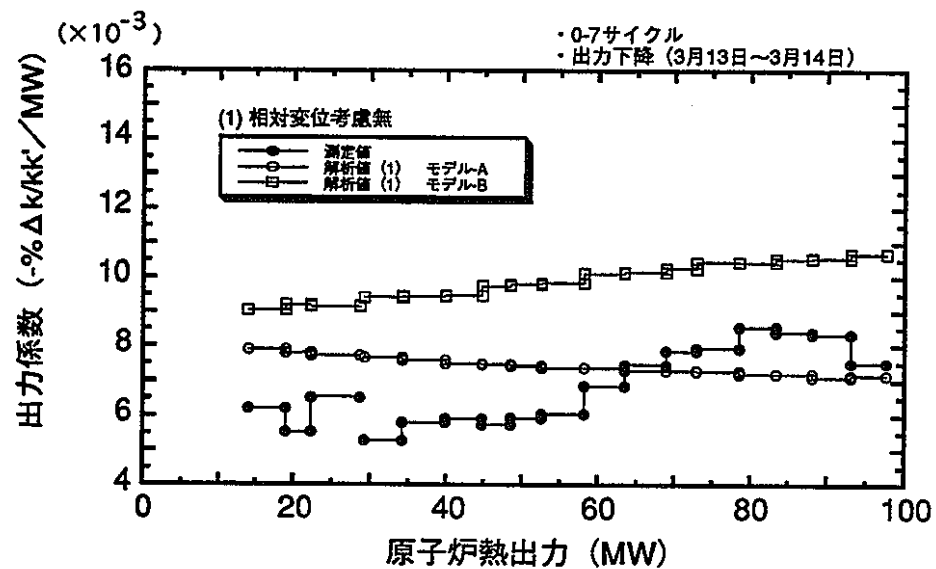


図2.6-12 第0-7サイクル出力下降における出力係数の測定値と解析値の比較

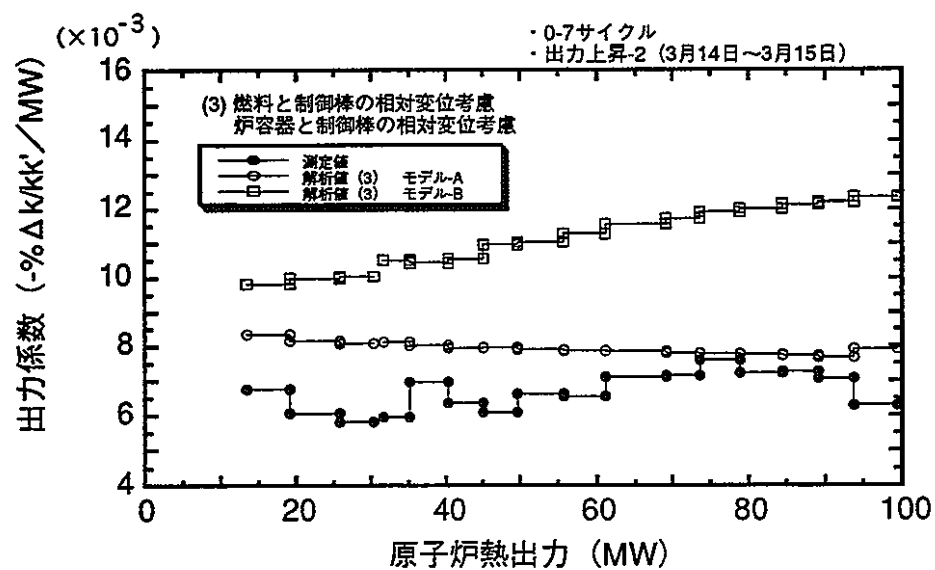
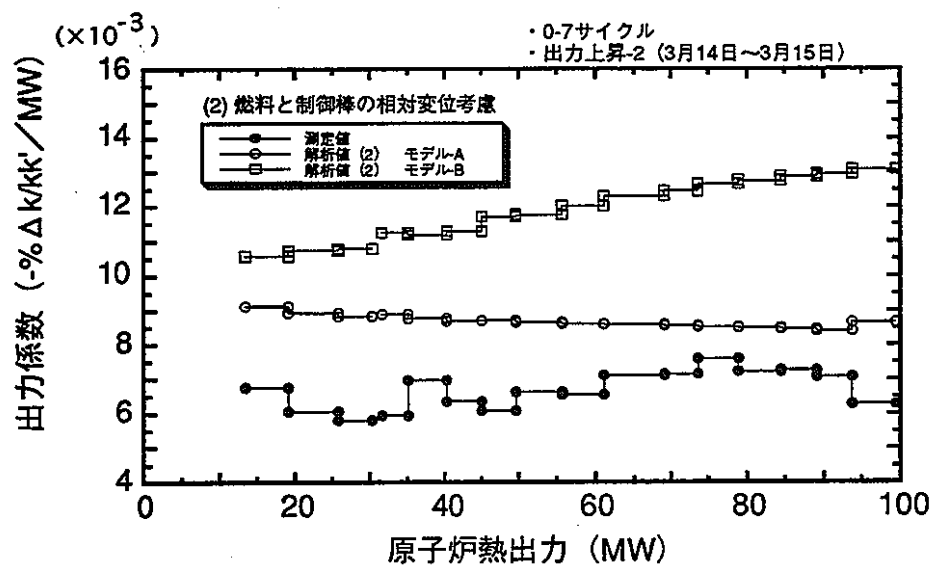
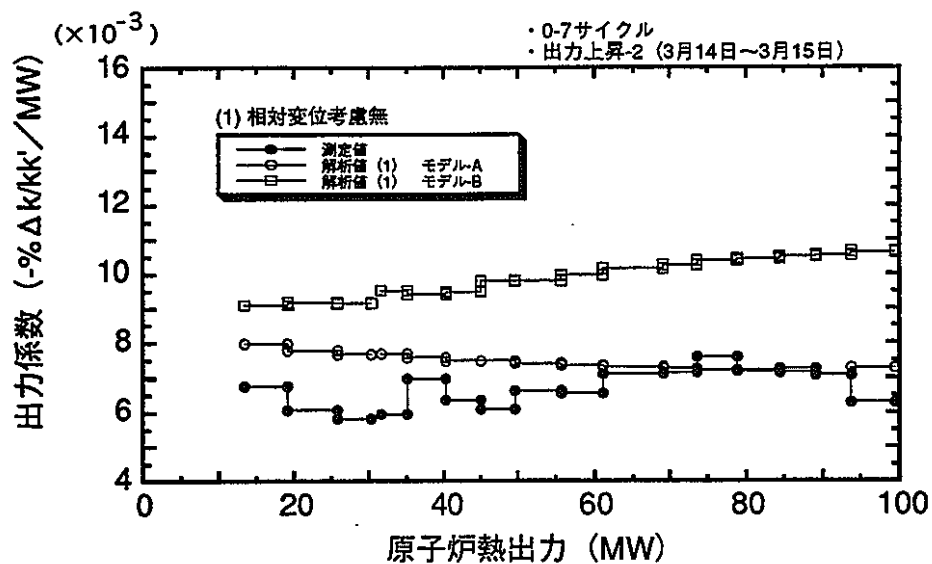


図2.6-13 第0-7サイクル出力上昇(2)における出力係数の測定値と解析値の比較

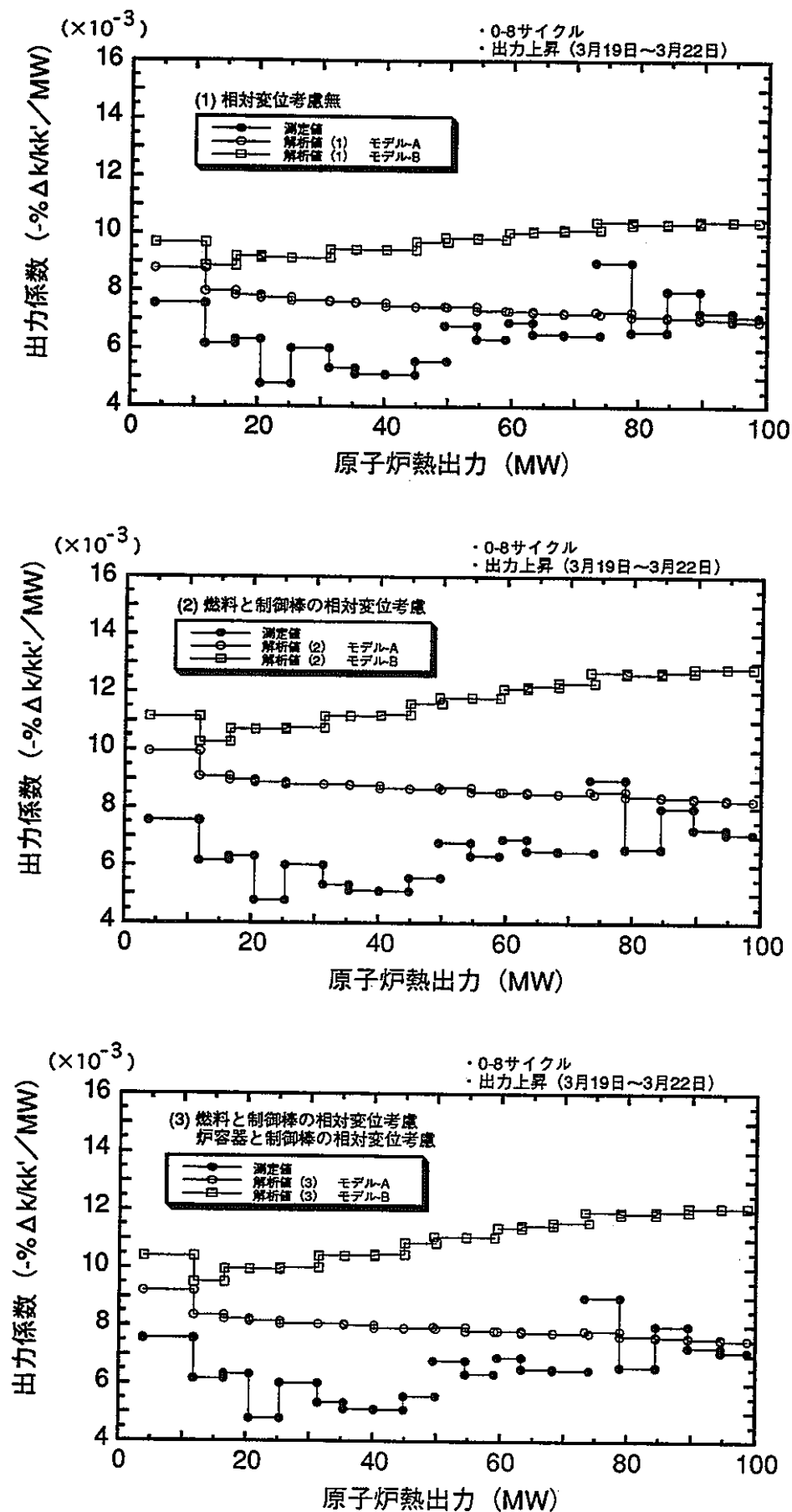


図2.6-14 第0-8サイクル出力上昇における出力係数の測定値と解析値の比較

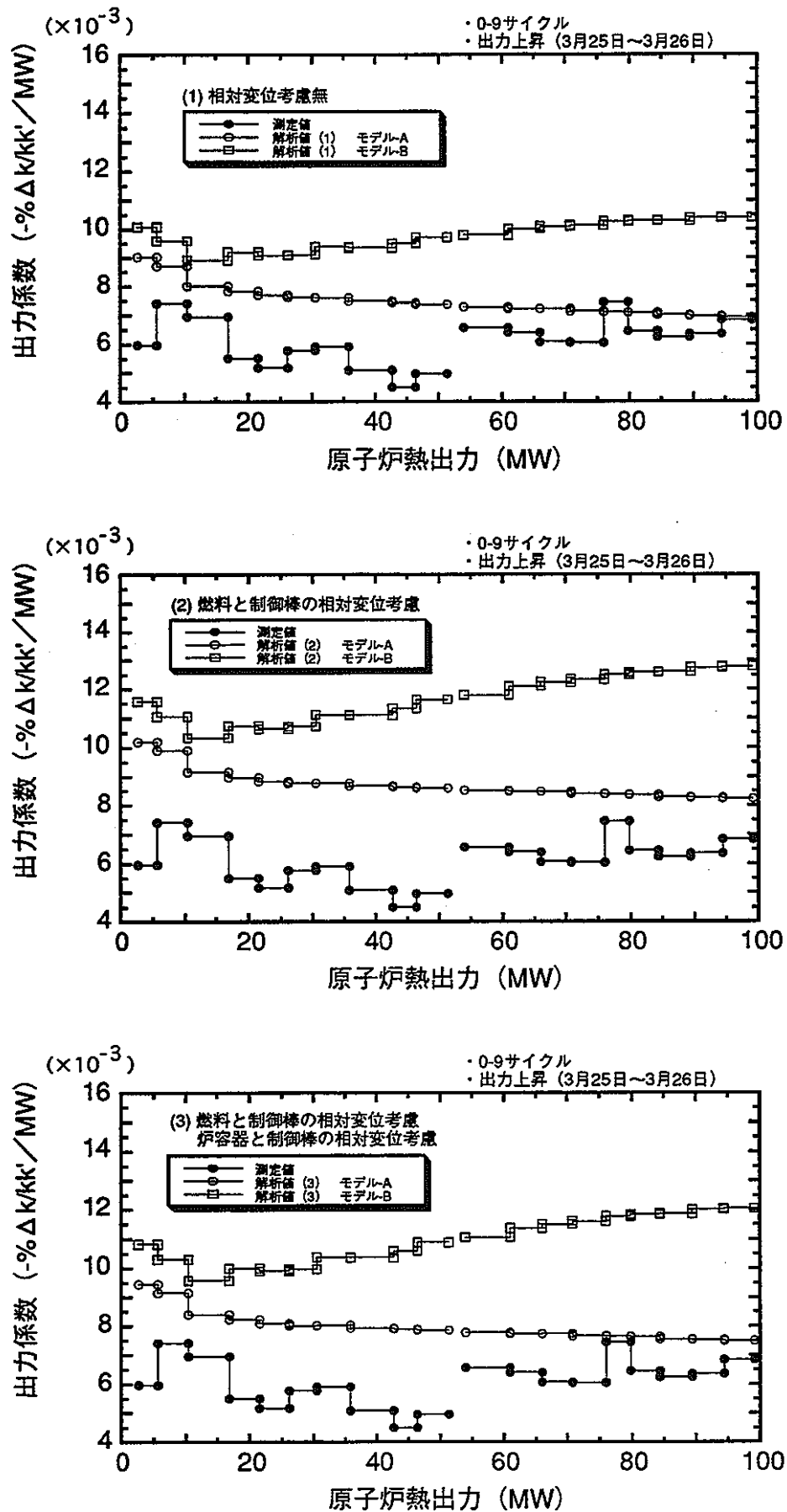


図2.6-15 第0-9サイクル出力上昇における出力係数の測定値と解析値の比較

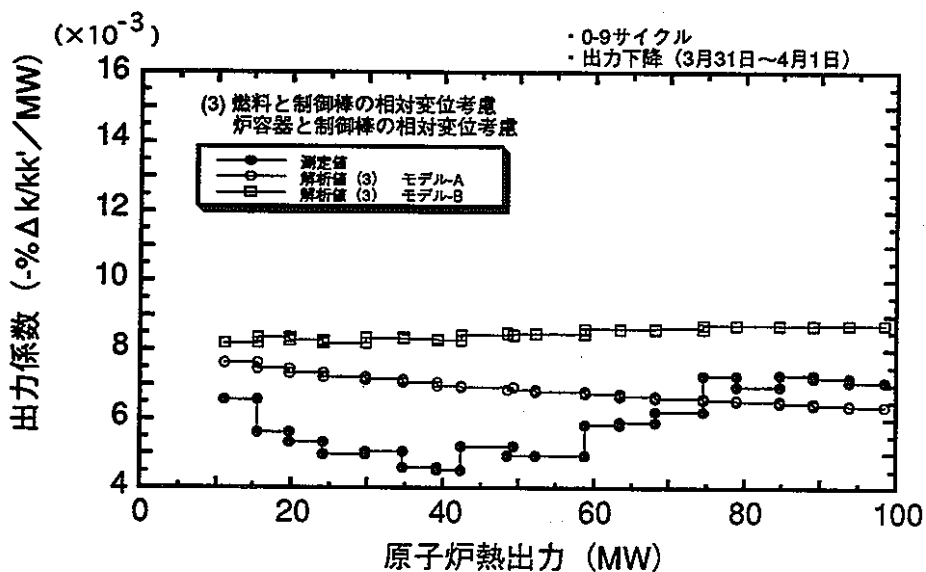
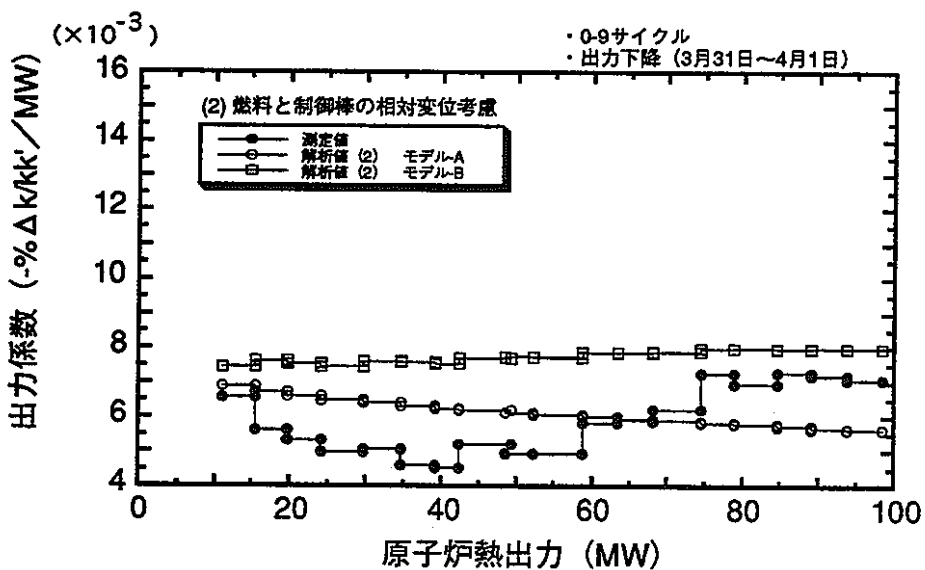
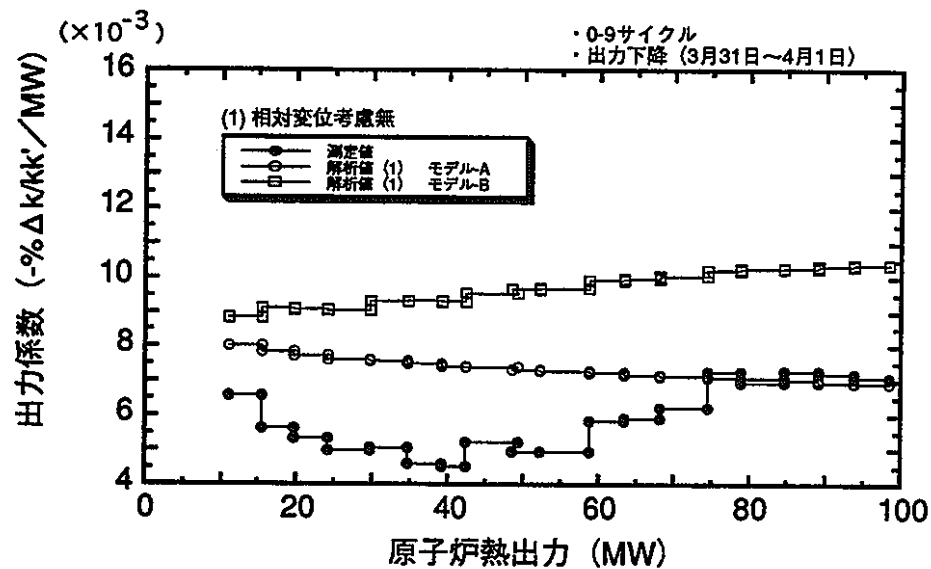


図2.6-16 第0-9サイクル出力下降における出力係数の測定値と解析値の比較

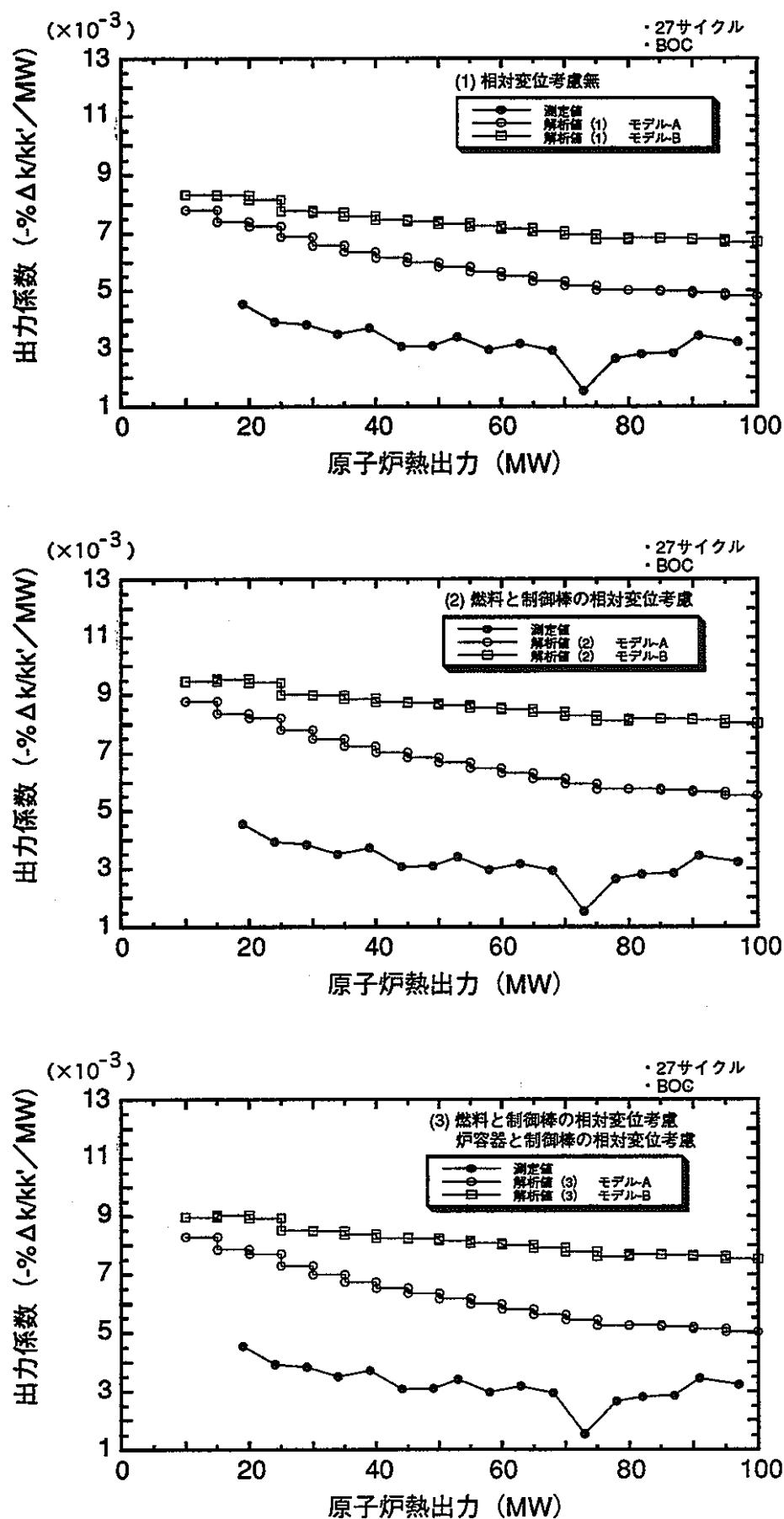


図2.6-17 第27サイクル初期出力上昇における出力係数の測定値と解析値の比較

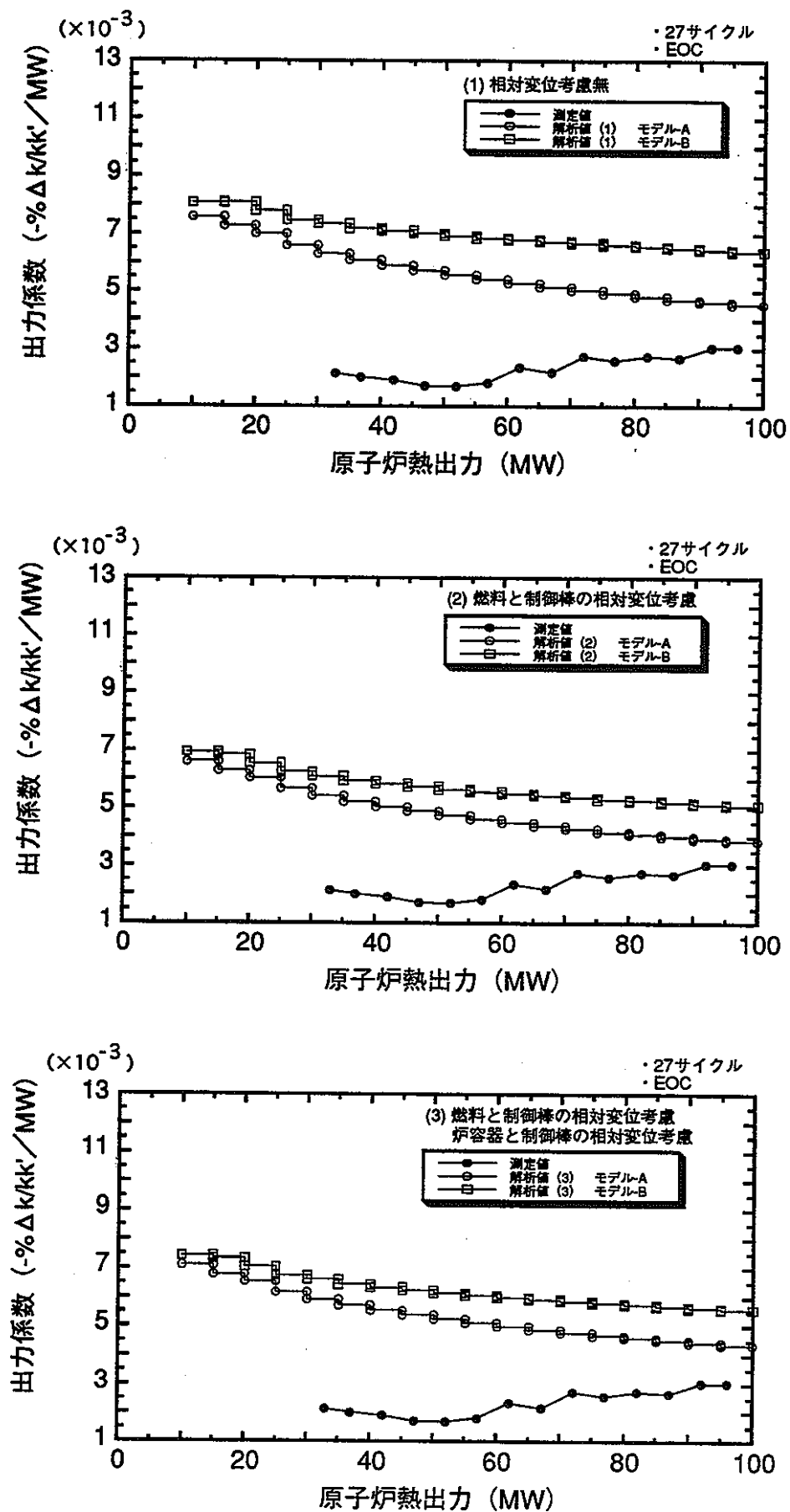


図2.6-18 第27サイクル末期出力下降における出力係数の測定値と解析値の比較

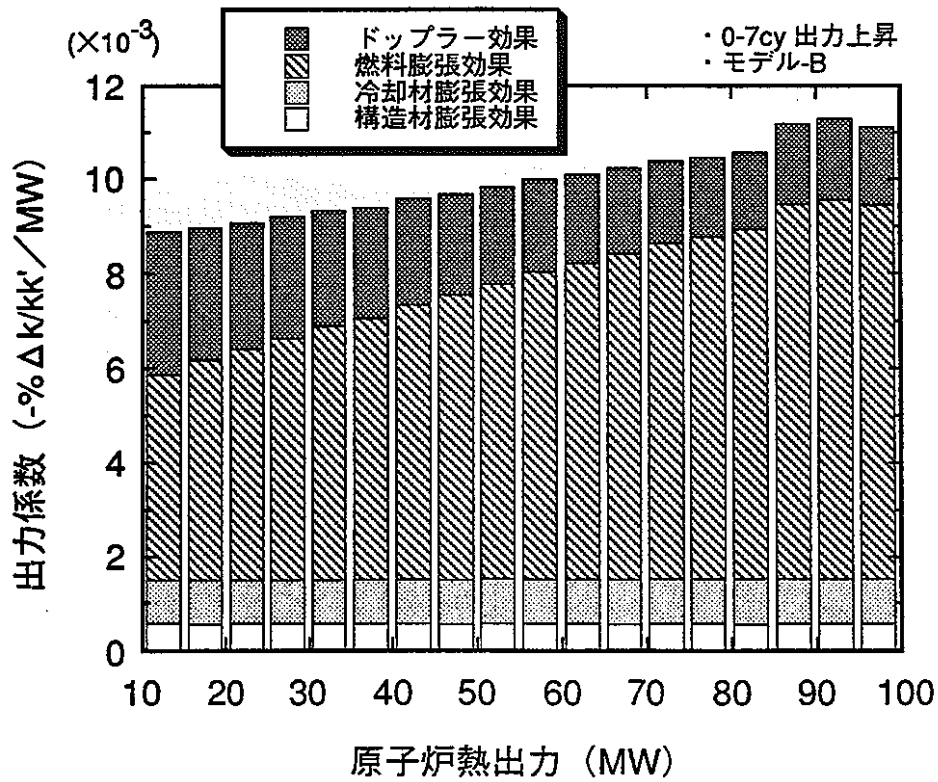
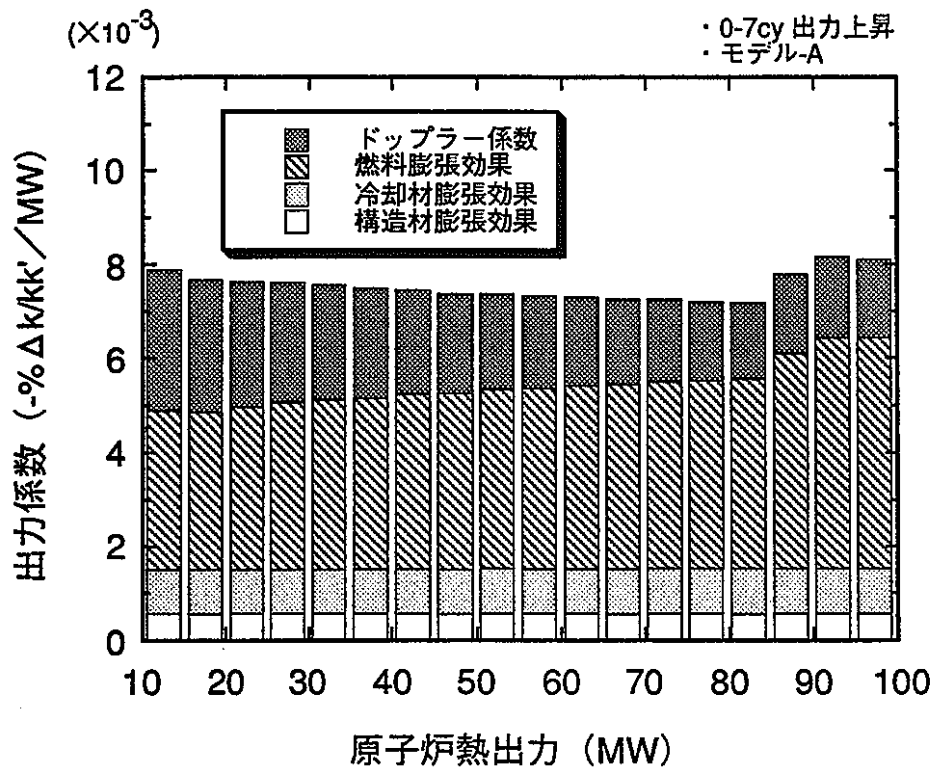


図2.6-19 第0-7サイクル出力上昇における出力係数の内訳（解析値）

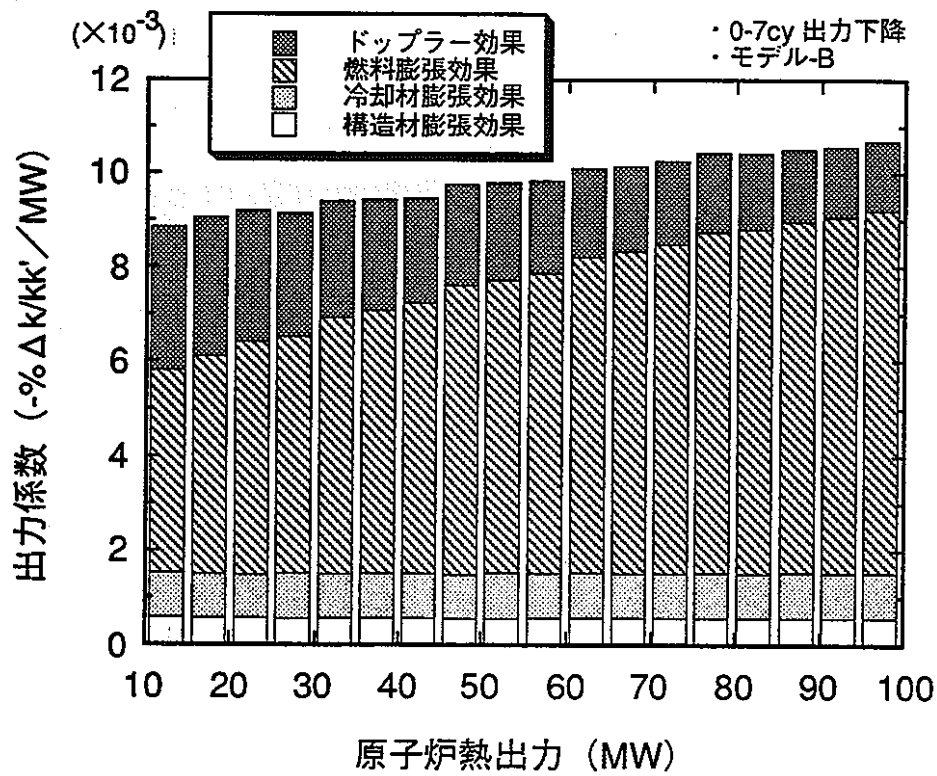
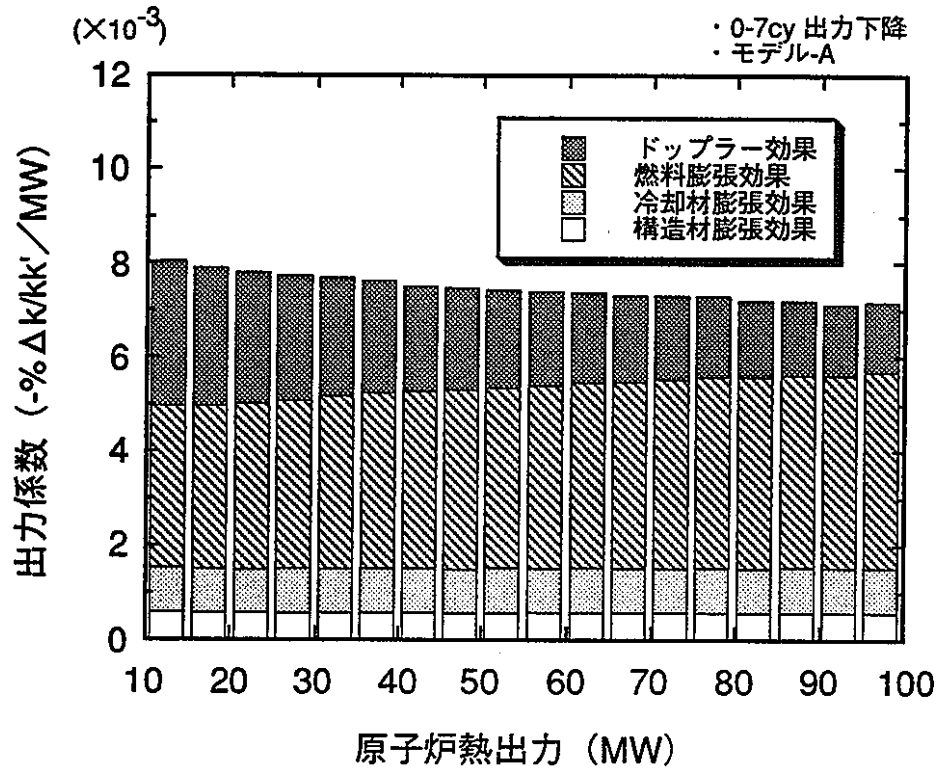


図2.6-20 第0-7サイクル出力下降における出力係数の内訳（解析値）

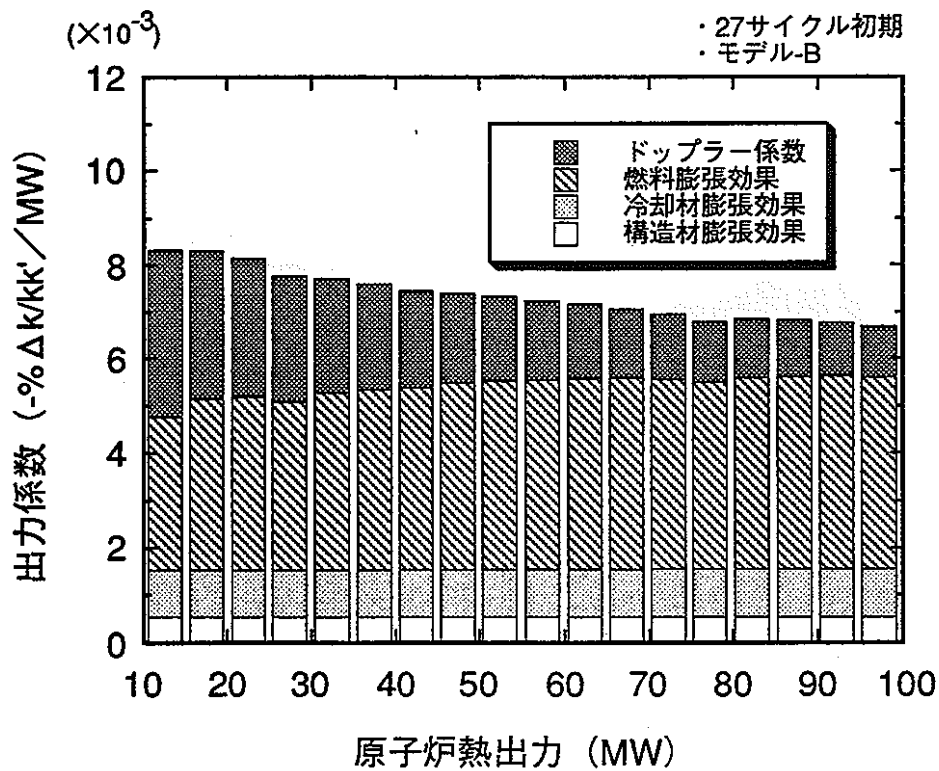
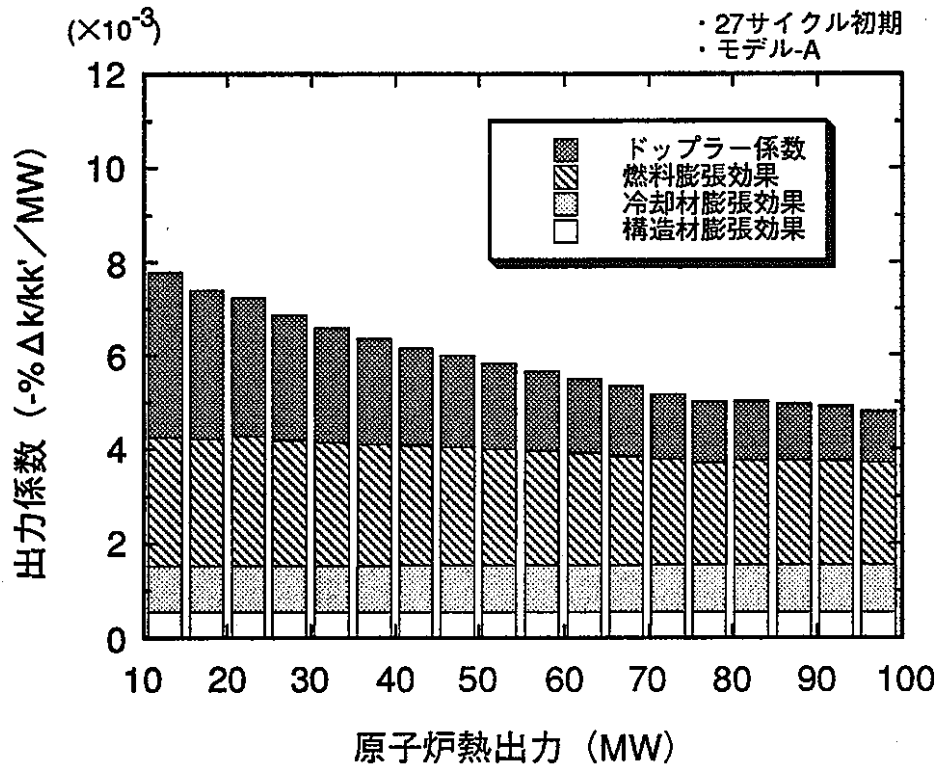


図2.6-21 第27サイクル初期出力上昇における出力係数の内訳（解析値）

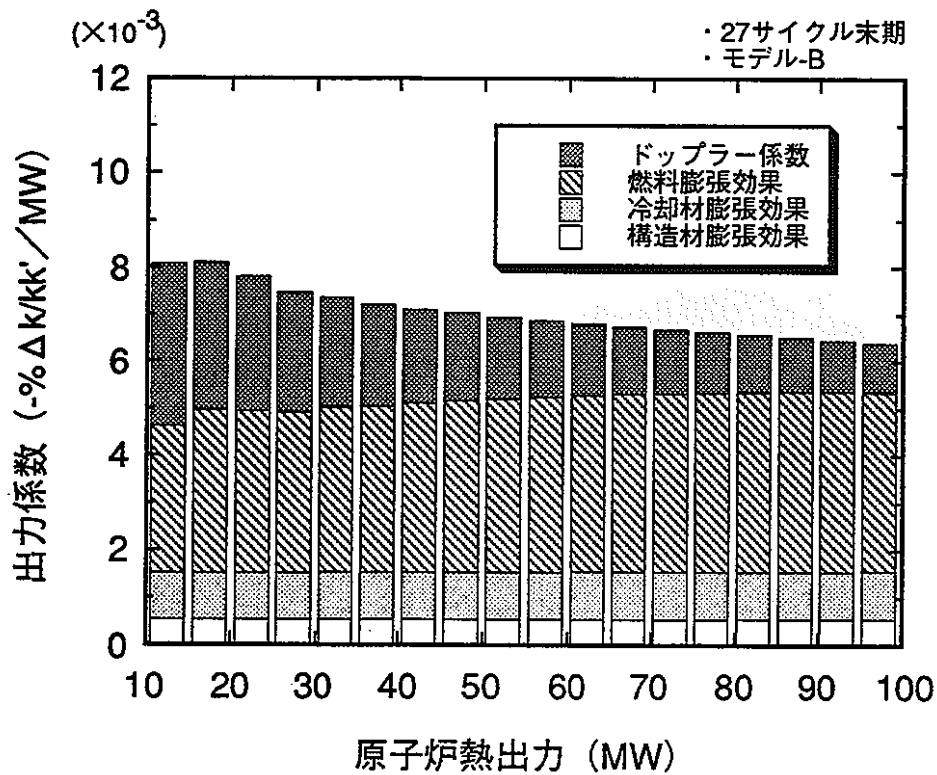
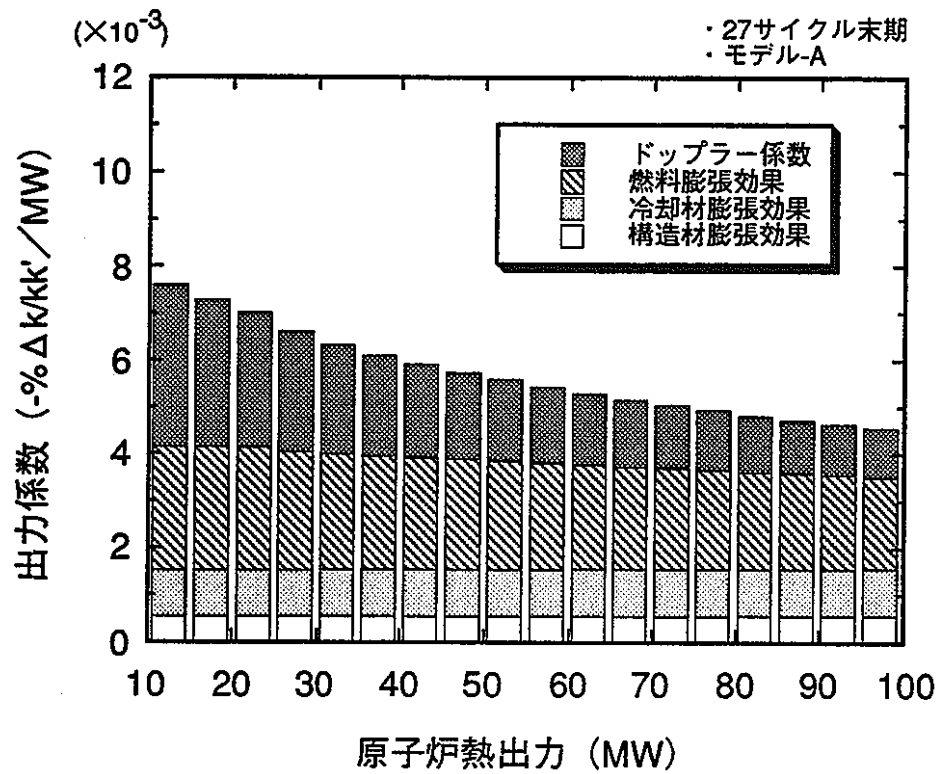


図2.6-22 第27サイクル末期出力下降における出力係数の内訳 (解析値)

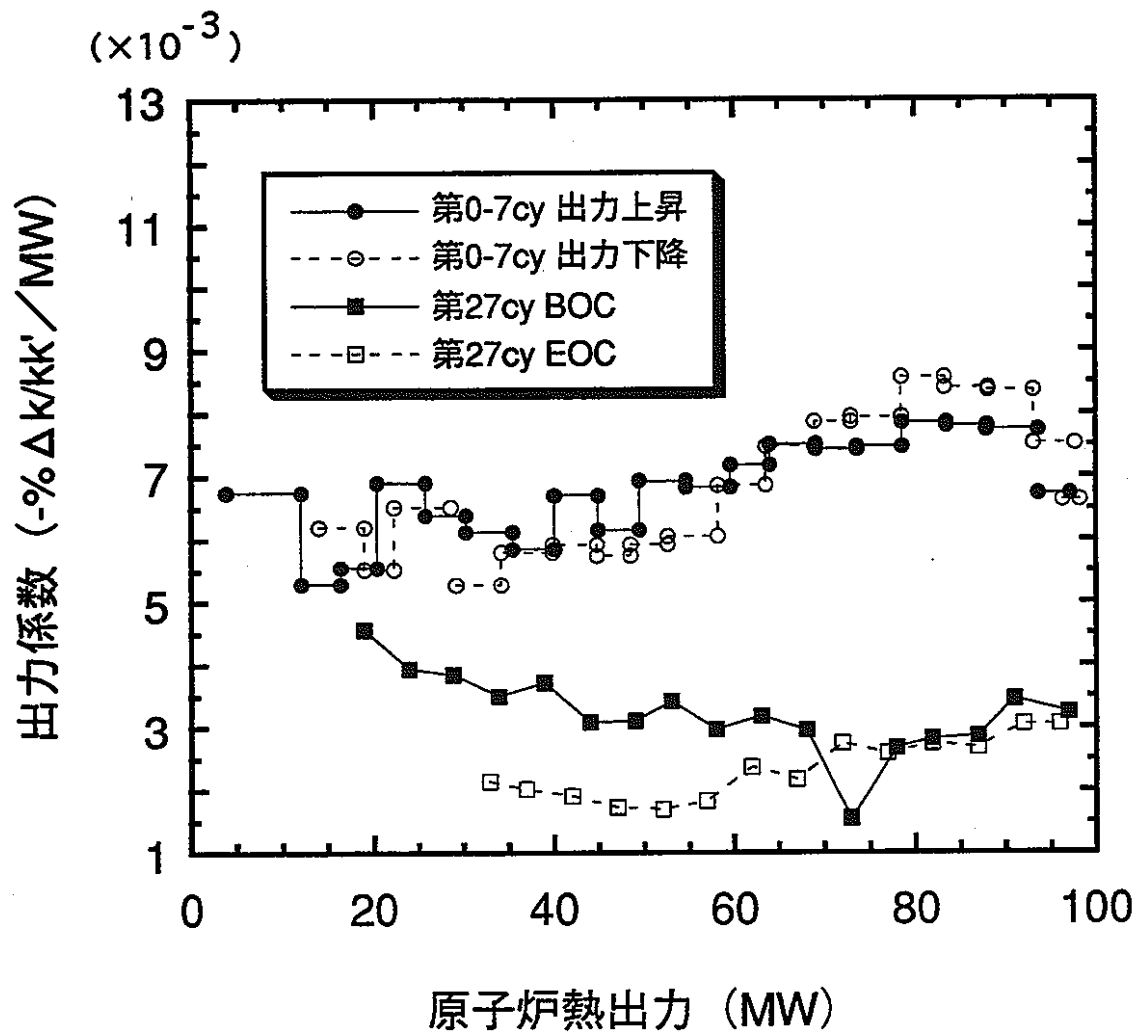


図2.6-23 第0サイクルおよび第27サイクルの出力係数測定値

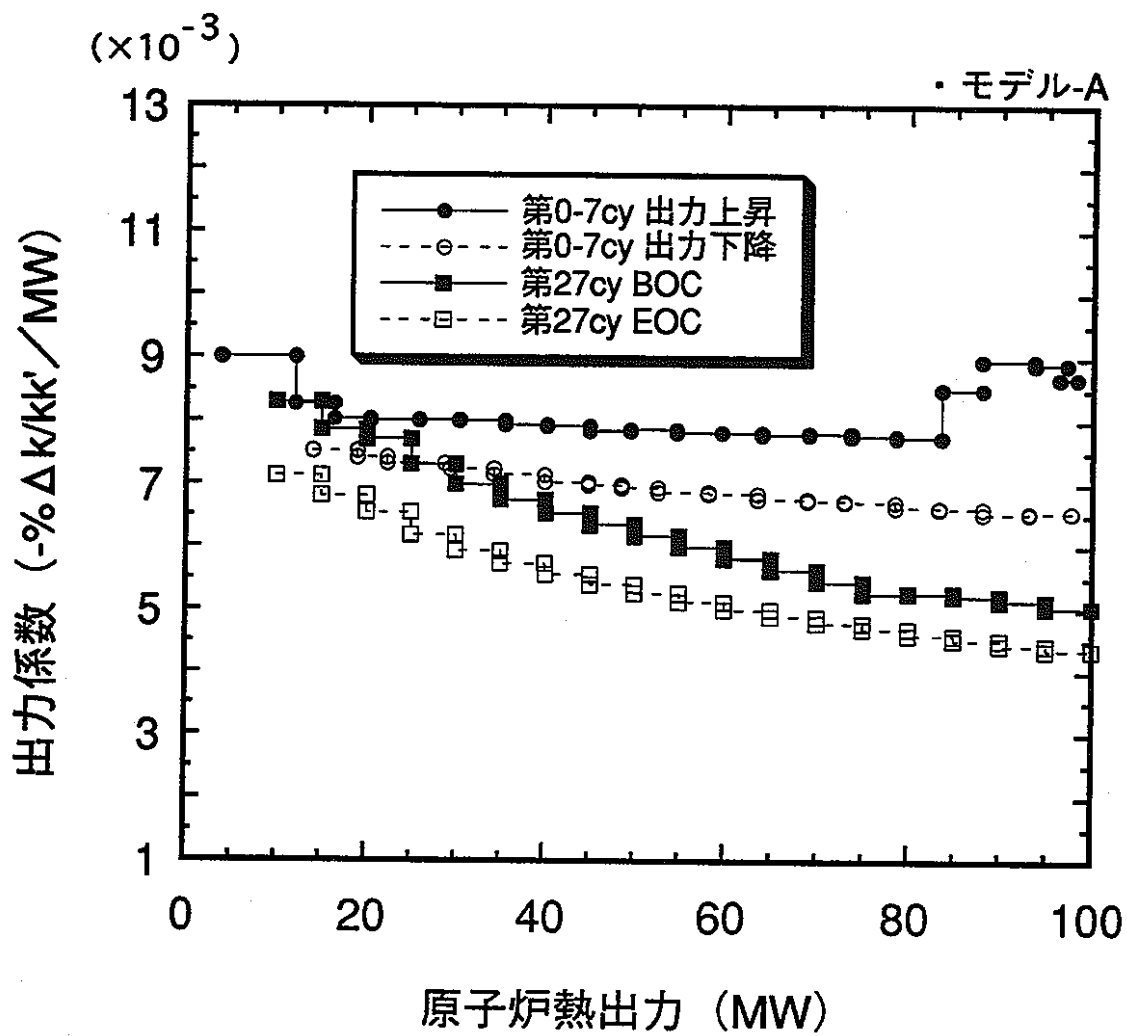


図2.6-24 第0サイクルおよび第27サイクルの出力係数解析値 (モデル-A)

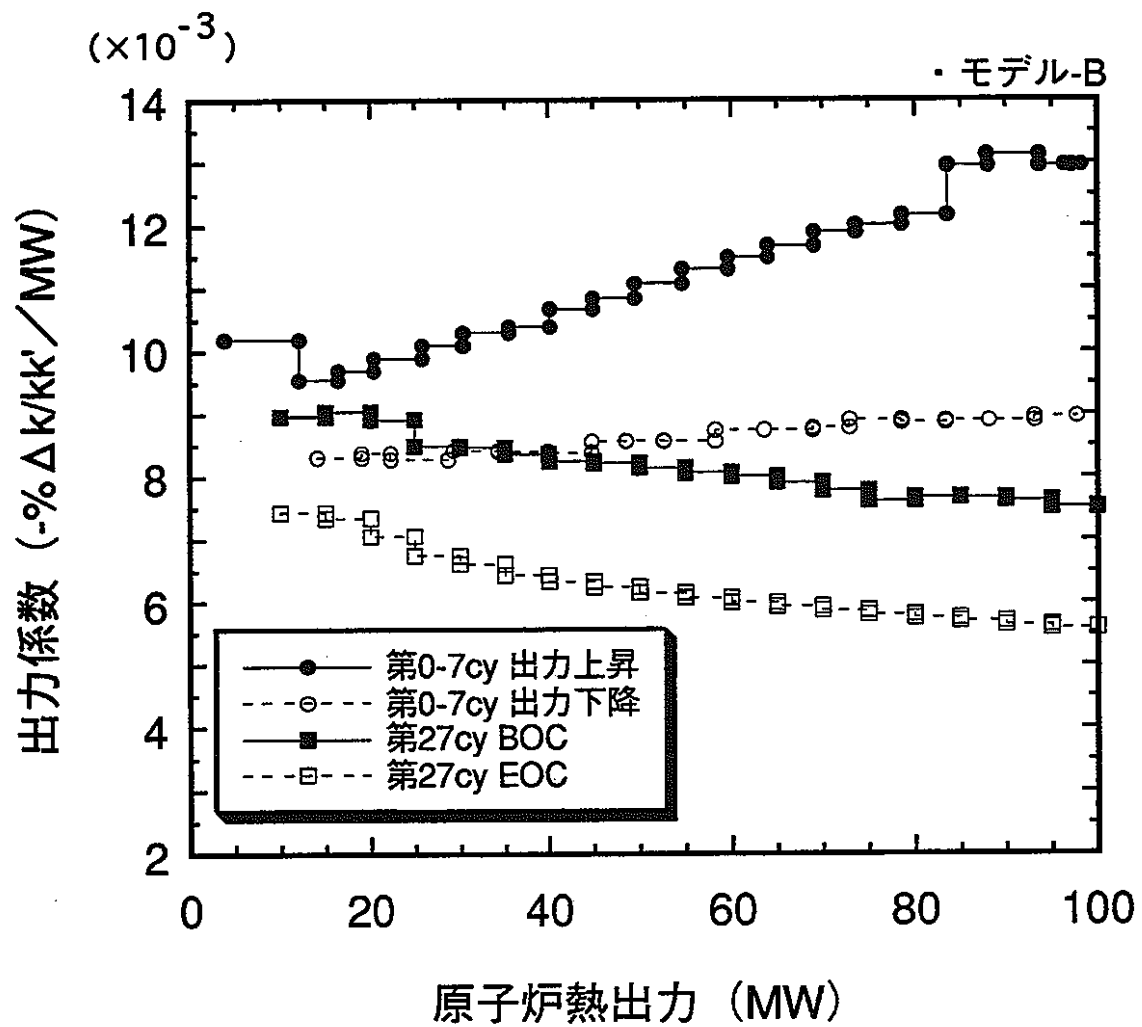


図2.6-25 第0サイクルおよび第27サイクルの出力係数解析値 (モデル-B)

2.7 まとめ

安全特性確認試験の予備検討として、「常陽」MK-II 炉心の各運転毎に測定されている反応度係数の支配要因を明確にするために、第0サイクル（出力上昇試験炉心）および燃焼の進んだ第27サイクルの出力係数の解析評価を行った。

主要な結論は以下のとおりである。

- a) 全体的に、出力係数の解析値は、絶対値で過大評価の傾向にある。特に、燃焼度が増大するにともなって、その傾向は大きくなる。
- b) 出力係数の炉出力依存性は、燃料の膨張効果およびドップラー効果によるものである。すなわち、出力係数は燃料の温度変化に依存する。
- c) 冷却材膨張効果および構造材膨張効果は、サイクル（炉心燃料の燃焼度）に関係なくほぼ一定値である。
- e) 出力係数の解析評価では、燃料集合体の照射履歴を考慮した燃料温度評価および燃料軸方向膨張モデルが重要である。
- f) 出力係数の炉出力依存性は、燃料軸方向膨張モデルとして燃料中心温度（モデル-B）で評価することで傾向はほぼ再現できる。
- g) 燃料膨張と制御棒の相対変位および炉容器と制御棒の相対変位のモデルの詳細化が重要である。

以上のことから、出力係数の絶対値は過大評価するが、炉出力依存性はほぼ再現できることが分かった。従って、反応度係数評価モデルの妥当性が確認できたといえる。

今後の課題として、フィードバック反応度モデルの検討して次のことが上げられる。

- a) 反応度係数の解析評価の検討（三次元解析）

b) 燃料膨張と制御棒の詳細な相対変位評価

燃料集合体の列毎に燃料膨張と制御棒の相対変位効果を評価する。

c) プラント運転履歴依存性の検討

- ・他のサイクルの出力係数の解析評価
- ・炉容器と制御棒の詳細な相対変位評価

d) 燃料熱伝導率等の物性値に係わる検討

本検討では、燃料熱伝導率としてS I E Xコード内蔵値を使用したのが、ANS/RAS 81-16(1981) データを使用したケースを参考に付録A.1 に示す。付録に示すように燃料温度は数 100℃高い評価値となる。物性値が燃料温度に与える影響は大きいといえる。また、種々の物性値の燃焼度依存性も検討する必要がある。

これらは、照射後燃料データの検査および解析結果を反映し、S I E Xコードのキャリブレーションが今後の課題である。

また、反応度係数の支配要因の明確のために、次のような試験も必要と考える。

a) 新燃料集合体の組織変化の有無および燃料集合体の湾曲の影響を調べるために、取替新燃料集合体10数体を炉心中心近傍に装荷した炉心と取替新燃料集合体10数体を炉心最外周に装荷した炉心の出力係数の測定。

b) 湾曲反応度の影響を調べるために、内側反射体を180度回転させたときの出力係数の測定。

c) 炉容器と制御棒の相対変位を調べるために、サイクル末期に出力下降の出力係数の測定を行った後、炉心温度が十分に安定してからもう一度出力上昇時の出力係数の測定とサイクル末期に出力下降の出力係数の測定を行った後、すぐに出力上昇時の出力係数の測定。

3. 海外高速炉における安全特性試験の調査

3.1 海外高速炉における反応度成分分離の検討

E B R - 2 炉における100%出力からの流量低下事象 (U L O F) 試験が行われている。制御棒挿入がなくても炉心の核熱特性のみで炉が停止状態が達成することが示されたものである。この種の100%出力からの安全性実証試験の実施にあたっては、炉心のフィードバック反応度の予測手法と予測精度が明確にされていく必要がある。当然、事前に部分出力試験などの事前情報を反映していくことが重要なプロセスである。

出力係数の成分のうち、初期状態の把握の難しさを含め、各種の複雑な現象の重なり合により生ずる炉心湾曲による出力係数の成分は、炉心状態がサイクル毎に変動する炉心では特に予測が難しいと考えられている。この効果は、近似モデルを通して炉心湾曲解析が行われ、手法・材料の物性値・炉心特性との関係の分析などにより予測精度の向上に努力が行われている。しかし、実際の照射状態の炉心では、燃料交換が行われるなど状況は更に複雑である。

E B R - 2 について、炉心湾曲による反応度成分の予測のための検討について調べた。

高速炉の反応度成分については、炉心固有のフィードバックの要素を測定する試みは行われている。例えば、反応度の投入によるドップラー成分を動的に測定するなどの検討がある。ドップラー成分は、そのメカニズムが明確であるので、燃料温度変化空間分布などの直接測定できない物理量に不確かさがあっても、事前情報としての予備試験の結果を、適切にバイアスする方法により、新たな炉心体系・条件における挙動は高い精度で予測できると考えられる。当然、このモデルの確定自体は容易な問題ではないが、原理的にも・実用的にも可能な範囲といえる。

したがって、安全特性試験として過渡挙動の予測においては、炉心湾曲に基づく成分の予測モデルを把握することは重要である。このための更なる検討を今後していくために、E B R - 2 における、湾曲反応度成分の把握のための検討を調査した。調査文献は D. Meneghetti and D. A. Kucera "Duct-Bowing Re

activity Trends in EBR-II”である。

EBR-2はウラン合金金属燃料をドライバーとする出力62 MWthの小型炉である。炉心は小型炉のためにドップラー係数が小さいこと、金属燃料であるので燃料の温度変化が小さいことなどにより、出力上昇時に反応度が線形的に変化する。これを“Linear Component”と呼んでいる。出力係数として、単位出力あたりの反応度変化率はほぼ一定となることに対応する。

この点では、EBR-2では「常陽」よりも照射履歴などは単純な挙動であると言える。即ち、予測を調整することが、“より容易”であることを意味している。安全特性試験を実施するにあたり、炉心の反応度フィードバックが十分な精度で予測ができることが必要となる。ここでは、EBR-2の出力係数のうちの“Non-linear Component”の解明に関する試みを調査した。

文献の主要な結果を示す。なお、原文献において必ずしも明確に表現していない部分については、本報告書の著者の責任で言葉を足している。

はじめに、EBR-2の運転時のフィードバック成分と“Non-linear Components”の関係を図3.1-1に引用して示した。

“Non-linear Components”は、運転炉心により大きく変化していることが示されている。図3.1-2にも示されている。

- a) この要因“Non-linear Components”は、“Linear Components+ Doppler”にくらべて、小さい場合が多い。運転履歴を整理（図3.1-8）するとつぎのことが示される。

Run 56-138で測定された出力反応度変化の履歴を見ると、“Linear Components”の標準値の $\pm 30\%$ の範囲で“Non-linear Components”が存在する。

- b) その出力依存性は一定していない。
- c) 集合体湾曲成分がその主要因と考えている。Run-to-Runの複雑な変化は集合体ダクトのZero Power時の変位が照射履歴・温度履歴などにより複雑に変

化することに基因すると考えている。特に、クリープ現象が関与しているという見解である。

- d) 運転履歴の複雑なことなどから、現実的にはZero Power時の複雑な変形（初期値分布に相当する）は模擬できない。そのために事前情報を利用して、この模擬出来ない部分をカバーして、試験体系などのはじめての炉心・出力状態を予測するために、計算モデルと組合せができる方法を調べている。
- e) 具体的には、照射によるダクトのswelling & Creepをパラメータとした計算を4つのRunについて行った。炉心を照射用集合体などが配置され非対称となっている炉心を6つのセクターに分割し、そのセクターごとに分割し、これらの重ね合わせにより湾曲反応度の予測を行う可能性を調べている。図3.1-3において、非均質配置がつよい93A炉心において、初期状態（zero swelling & zero creep）の場合の熱湾曲反応度を求めている。炉心一括全体計算と分割計算結果の関係を調べるために計算値同士の比較である。この体系では各炉心セクター（記号A, B, C, D, E, F）からの寄与の重ね合わせが成立している。しかし、分割セクターの寄与は図3.1-3の上段の図に示すように反応度の寄与は異なっている。これは、炉心配置の非均質性がつよいことに起因していることを示している。前提として照射履歴の分かりやすい初期状態を仮定しているが、非均質性の違いにより集合体接触時の出力レベルの違いなどが異なりセクター毎に湾曲反応度への違いが生じている。一方、実際には照射履歴によりスウェリングとクリープ効果が重なると、炉心一括計算に使用する集合体間のギャップ幅などの初期値分布を予想することは不可能と言える。したがって、セクター毎のモデル計算では初期値分布は“適当に”想定して行い、全炉心反応度の予測には、事前情報を考慮してセクター毎の重ね合わせの荷重などを調整する余地を残すというモデルが想定されている。
- f) 図3.1-4 とには RUN 99Aにおける第8列の反射体の引き抜き集合体ダクト変位は計算でほぼ再現できることを示している。図3.1-4 はスウェリング量に対する拘束条件なし（Swelling Only で Creepなし）の場合のまがり量の計算値と測定値をもとに同一条件（Creep なしの状態）に帰納した結果との

比較である。測定値の Creepなしの条件への外挿については詳細は述べられていない。同図では集合体頂部付近では50mm程度のまがりを示している。また、図3.1-5 は拘束されたダクトの条件下の計算と測定結果の比較である。集合体頂部では 5mm程度である。これらの結果は、要素としての計算モデル は、変位量が条件により変動するがそれぞれの予測は同程度の精度で予測できることを述べている。

- g) Run 99A &122A において、zero swelling & zero creep（運転履歴反映なし）を含め、swelling onlyと swelling & creepケースをサーベイした結果を図3.1-6, -7に比較している。これらの結果は、対象炉心の初期スウェリング・クリープがセクター毎に変動する場合の湾曲反応度の出力依存性を示している。初期条件分布によりかなり変動することが示されている。
- h) これからの推測として、測定をベースにした"Non-linear Components" は、複雑すぎる"zero power"変形を初期変形とした場合でも、これらの組合せである程度あらわせるとしている。ただし、具体的な重ね合わせを具体的に示していない。

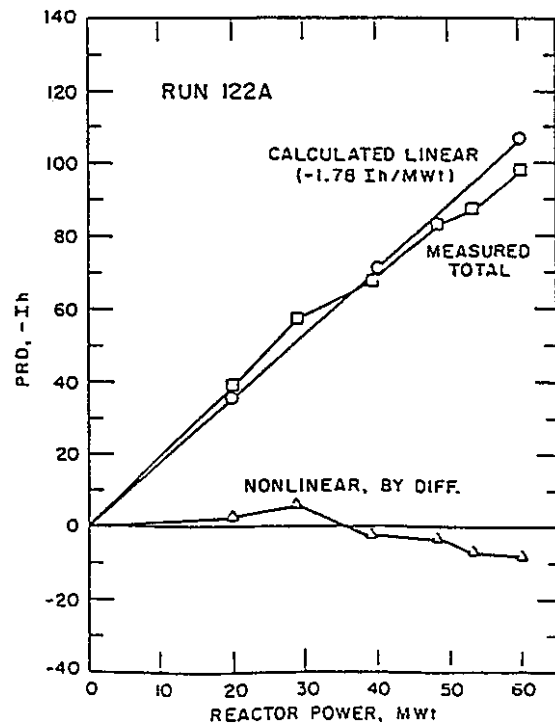
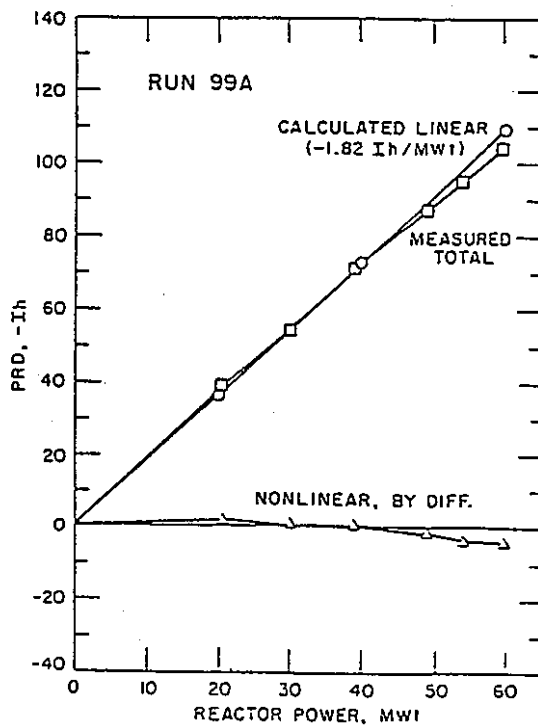
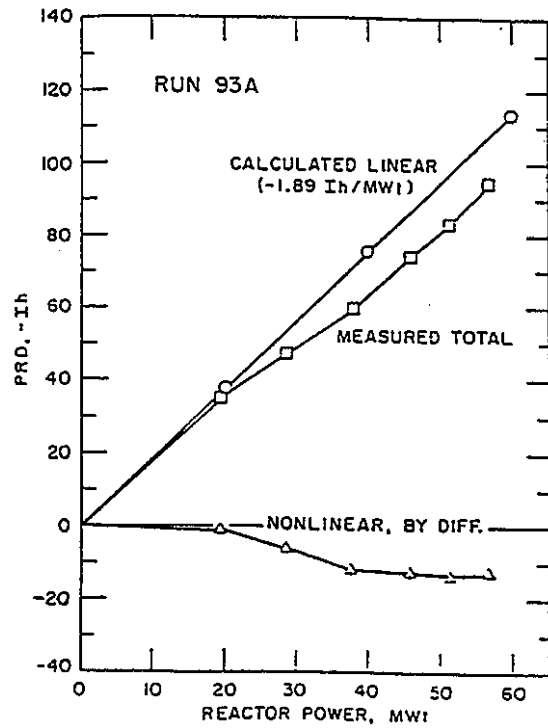
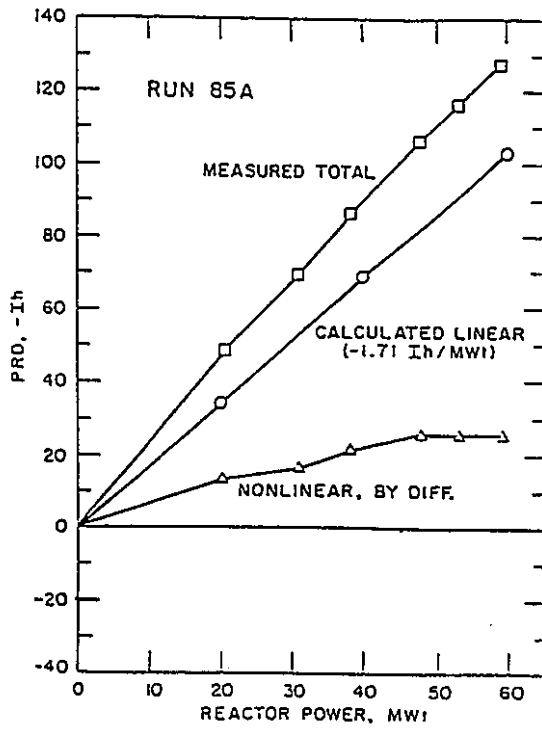
3.2 まとめ

前記の例は、E B R - 2 炉心の出力変化に伴う測定をベースにした“Non-linear Components”は、炉心湾曲による反応度効果と解釈し、異なる炉心について一見系統性の示されていない反応度効果を、swellingとcreepの初期値の有無などの異なる状態の組合せとして、それぞれの炉心配置を反映して、ある程度再現されるというものである。

これらの組合せの系統性を炉心状態の関連で説明できるかが今後の検討課題と考えられるが、この点については議論されていない。

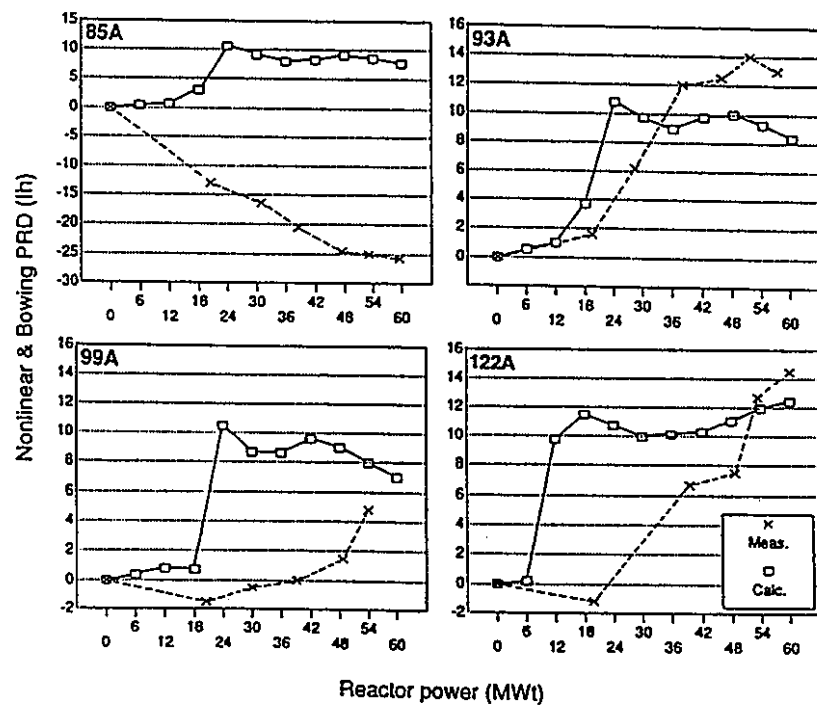
「常陽」については、これまで、それぞれの炉心の湾曲解析が行われている。これらの解析では、照射履歴をもとにした初期値分布を、計算モデルに併せて簡易化して個々の解析を行ってきたと考えられる。前述の文献調査の結果は、事前情報の反映を前提とした試行例と考えることができる。「常陽」に対しては、複雑な照射・運用履歴の反映に、何を対象として重ね合わせをするのがよいか等”重ね合わせ”法が有効かどうか、および安全特性試験のための事前解析・測定情報として反映できるか調べる必要があると考えられる。湾曲計算については、観測事実を合理的に説明できるモデルを適用することは検討の必要条件であることは、事前情報の反映を精度よく出来るために要請されることは明白である。

これらの検討には、炉内の集合体変位が測定されることは、運転に伴うダクト変形による初期変位量が明確になり、現象の把握に有効と考えられる。



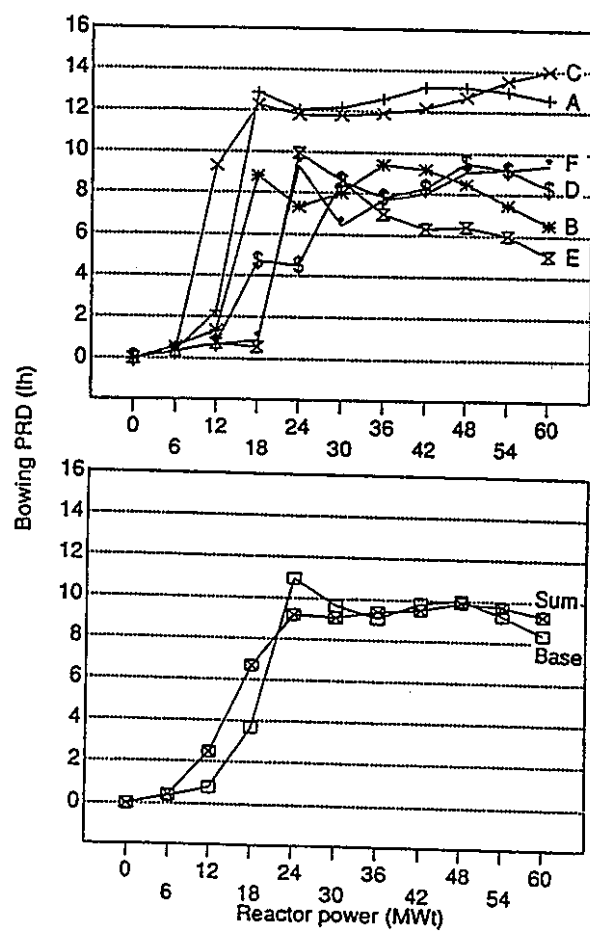
Calculated Total Linear PRD Components and Measured Total PRD Values for EBR-II Runs 85A, 93A, 99A, and 122A.

図3.1-1 EBR-2 炉における出力上昇による反応度変化の線形・非線形成分の分離例
(Run 85A, 93A, 99A, 122A)



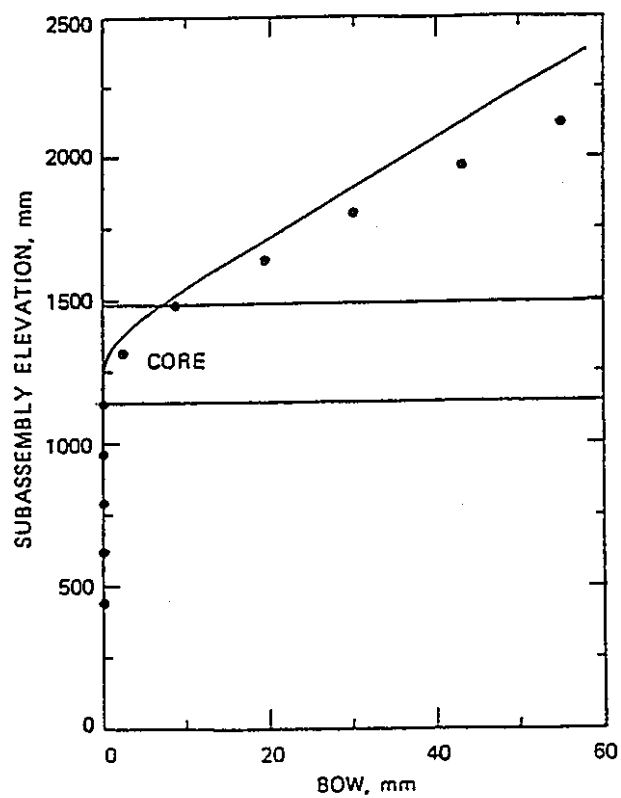
Calculated thermal bowing PRD components assuming unirradiated ducts compared with measurement-deduced nonlinear values for EBR-II runs 85A, 93A, 99A and 122A.

図3.1-2 EBR-2 炉心湾曲計算（ラップ管未照射想定）結果による反応度と測定値から
帰納した非線形成分の比較（Run 85A, 93A, 99A, 122A）



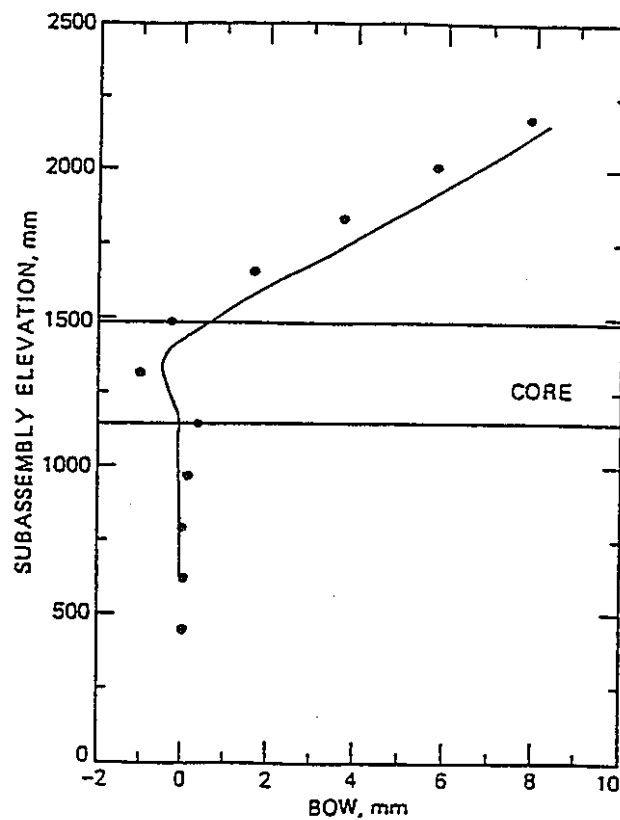
Comparisons of calculated sector-delineated (top) and nonsector-delineated (bottom) thermal bowing components of the PRD for EBR-II run 93A.

図3.1-3 EBR-2 RUN 93A における湾曲計算モデル（セクター分割、非分割）の違いによる反応度計算結果の比較



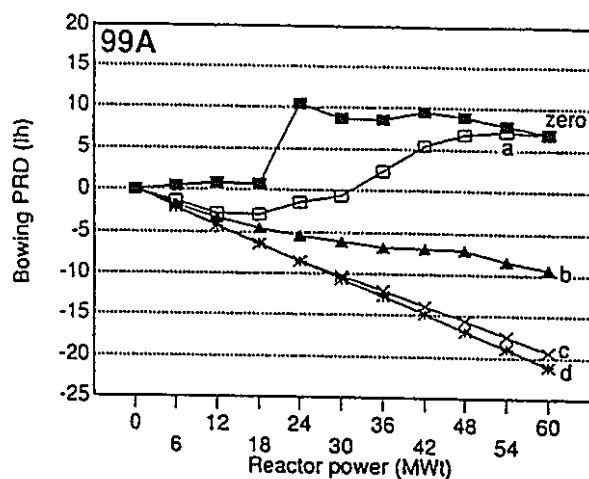
Comparison of calculated (●, case 99A, row 8 at 60,000 MWd) with measurement-deduced [reflector U-8807 at ~62,500 MWd (Shields, 1981)] unrestrained swelling-induced row 8 reflector duct deflections.

図 3.1-4 EBR-2 RUN 99A における集合体湾曲量の計算と測定値の比較(1)

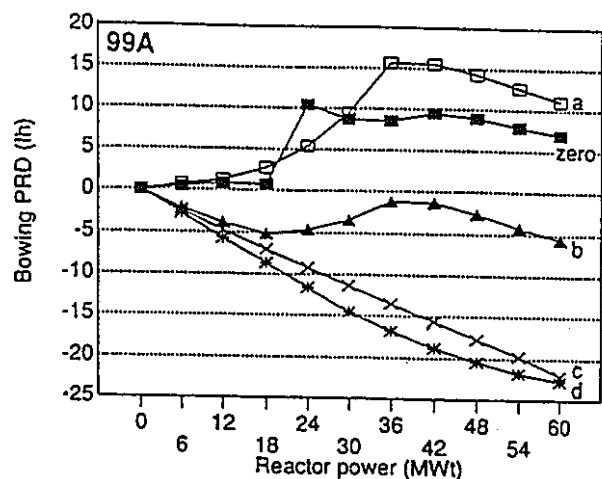


Comparison of calculated (●, case 99A, row 8 at 60,000 MWd) with measured [reflector U-8807 at ~62,500 MWd (Shields, 1981)] row 8 reflector duct profiles resulting from void swelling and creep of a restrained duct.

図3.1-5 EBR-2 RUN 99A における集合体湾曲量の計算と測定値の比較(2)

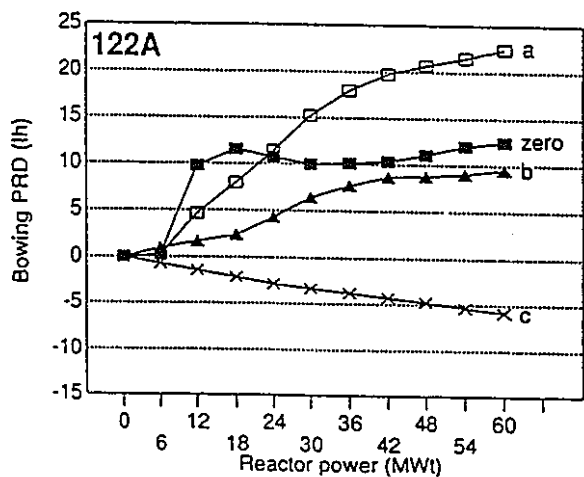


Trends in bowing reactivity resulting from increasing (a-d) irradiation void-swelling of reflector and blanket ducts for the run 99A cases, assuming no creep.

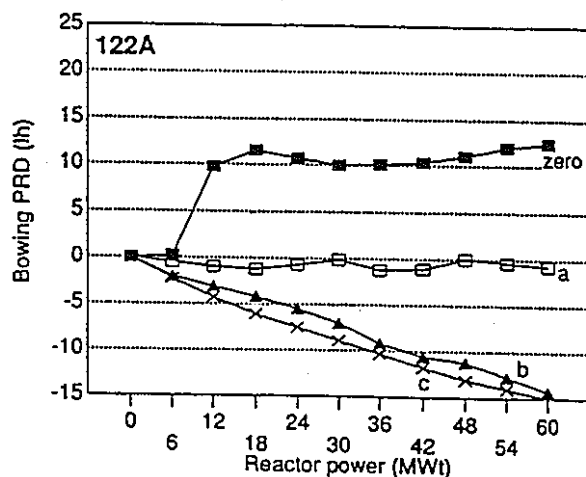


Trends in bowing reactivity resulting from increasing (a-d) irradiation void swelling and creep of reflector and blanket ducts for the run 99A cases.

図3.1-6 EBR-2 RUN 99A 炉心における湾曲計算における初期スエリング設定量の変動とクリープの組合せサーベイ結果

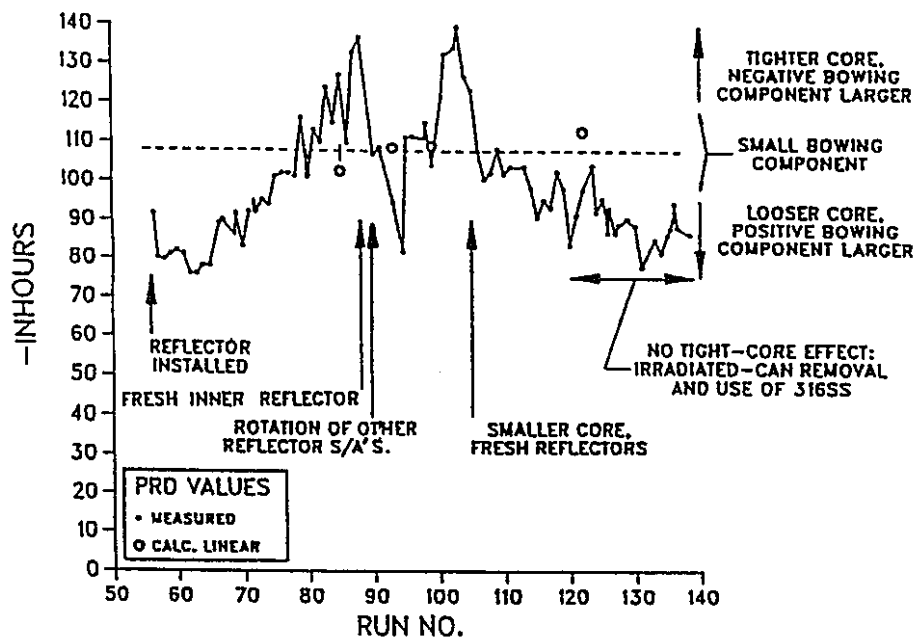


Trends in bowing reactivity resulting from increasing (a-c) irradiation void swelling of reflector and blanket ducts for the run 122A cases, assuming no creep.



Trends in bowing reactivity resulting from increasing (a-c) irradiation void swelling and creep of reflector and blanket ducts for the run 122A cases.

図3.1-7 EBR-2 RUN122A 炉心における湾曲計算における初期スエリング設定量の変動とクリープの組合せサーベイ結果



Correlations of observed variations of the total PRDs with chronologies of reflector duct changes for EBR-II runs 56-138.

図3.1-8 EBR-2 RUN 56～ 138までの間の反射体交換と出力上昇に対する反応度減少量観測値の相関関係

4. おわりに

安全特性確認試験の予備検討として、「常陽」MK-II 炉心の各運転毎に測定されている反応度係数の支配要因を明確にするために、第0サイクル（出力上昇試験炉心）および燃焼の進んだ第27サイクルの出力係数の解析評価を行った。評価の着眼点は燃料の照射挙動などを全炉心レベルでモデル化に取り入れることで、出力係数の全体の傾向が説明できるかどうかを検討することである。

主要な結論として、出力係数の解析評価では、燃料集合体の照射履歴を考慮した燃料温度評価および燃料軸方向膨張モデルが重要であること、および出力係数の炉出力依存性は、燃料軸方向膨張モデルとして燃料中心温度反映モデルで評価することで傾向はほぼ再現できることがわかった。

このことは、炉心の固有の反応度係数と燃料温度変化に基因する出力係数の予測は、今回適用したモデルをベースに、測定結果を”適切に”調節するモデルを取り入れる方式を今後の研究のなかで確立していくことで、安全特性試験のための予測精度の高い反応度係数モデルを設定することが可能な事を意味している。

このような、事前情報をどのような範囲で測定し、総合評価モデルへの反映自体は簡単なものではない。具体的には、要求精度との関係もあり今後詰めていく必要がある。一部、要因分析のための試験案などについても摘出している。

また、プラントの構造に直接関わる反応度、炉心湾曲効果など試験の初期状態を明確に定義することが困難なことによるモデルの難しさをどのように考慮するかについても今後検討を深化させる必要がある。

炉心湾曲効果については、初期状態の定義の難しさを考慮して事前情報を有効に利用する方法の例として、異なるモードの重ね合わせとして表現することを試みるなどのアプローチがとられていることがEBR-2を対象にした検討の調査よりわかった。

「常陽」では、出力係数の出力依存性がEBR-2より複雑であり、同様の方法の有効性検討も今後の課題のひとつであることがわかった。

今後は、本年度の成果をもとに、要因分析の立場から試験解析と、必要な試験

の抽出をしていくこと、プラントに直結した制御棒延長管・炉容器の温度応答モデルの詳細化、炉心湾曲モデルなどを含めた総合評価モデルの検討をしていくことが重要である。同時に、各モデルの精度評価をすすめることも大切な要素である。

付 録

A.1 燃料熱伝導率の比較

A.1 燃料熱伝導率の比較

本文では、燃料熱伝導率はS I E Xコード内蔵値を使用した。ANS/RAS 81-16(1981)を使用したケースを参考に示す。燃料再結晶領域の生成ステップを表A.1-1に示す。燃料再結晶領域が炉心全体に拡大していることが分かる。また、燃料平均温度および燃料中心温度を径方向列毎に図A.1-1～図A.1-6に示す。原子炉出力が100MW状態の燃料温度は、燃料熱伝導率がS I E Xコード内蔵値に比べて、燃料平均温度で約150℃、燃料中心温度で約300℃高く評価していることが分かる。

従って、ANS/RAS 81-16データ等の組み合わせの温度計算については、「常陽」の照射後燃料データの検査および解析結果を反映し、S I E Xコードの「常陽」へのキャリブレーションが今後の課題と考える。

表A.1-1 第0サイクルにおける等軸晶領域、柱状晶領域及びセンターボイド領域の生成ステップ
 - 燃料熱伝導率; ANL/RAS 81-16(1981) -

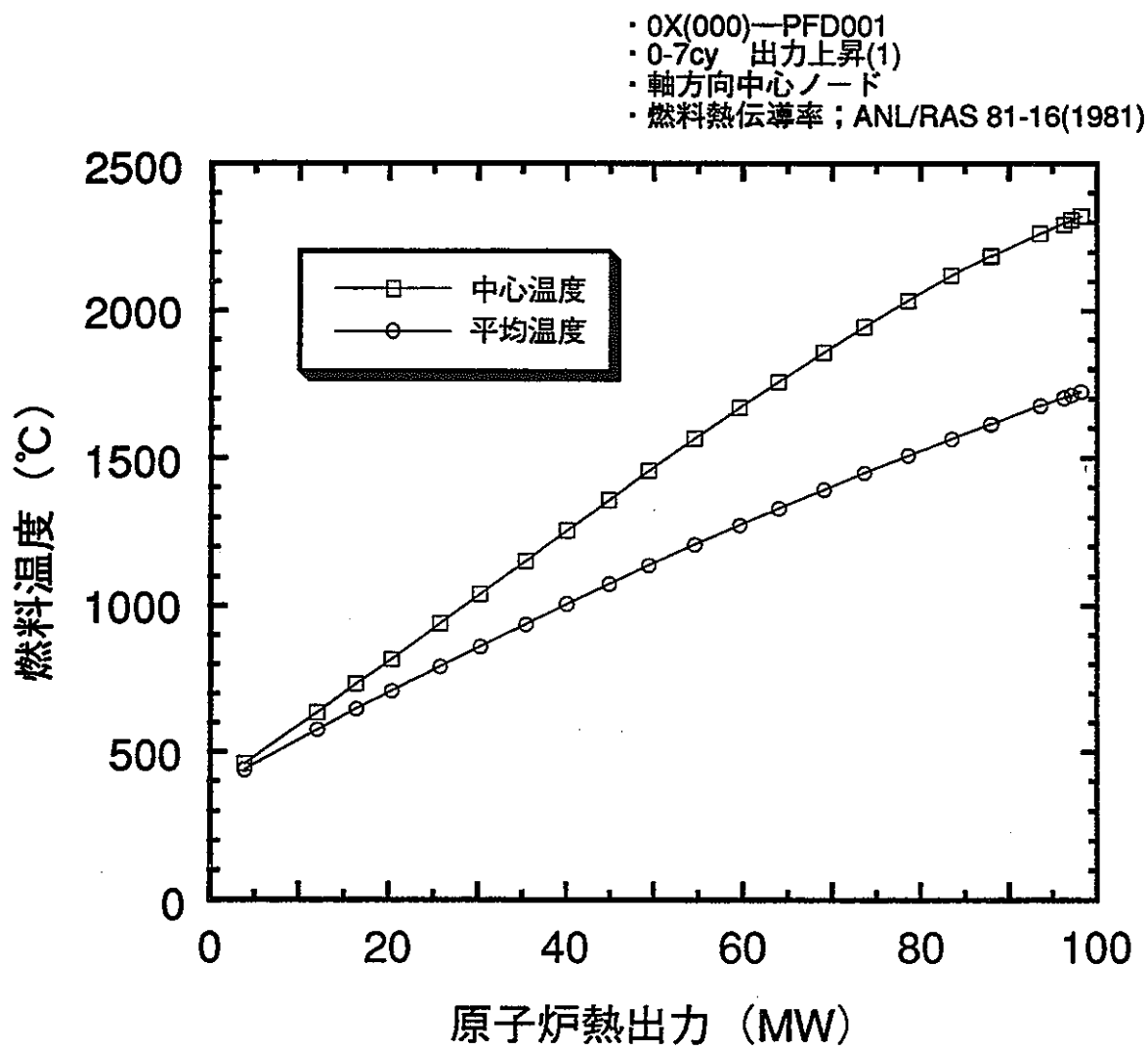
ノード 番号	0x (000) pfd001	1x (1b1) pfd003	2x (2b1) pfd010	3x (3b1) pfd022	4x (4b1) pfd036	5x (5b3) pfd057
1	63- 93- 93	70- 96- 96	74-102-102	99- -	- -	- -
2	60- 63- 63	60- 71- 71	61- 93- 93	74-102-102	- -	- -
3	58- 61- 61	59- 61- 61	60- 71- 71	63- 96- 96	99- -	- -
4	58- 59- 59	58- 60- 60	59- 61- 61	61- 74- 74	96- -	99- -
5	57- 59- 59	57- 59- 59	59- 61- 61	60- 71- 71	93- -	96- -
6	57- 59- 59	57- 59- 59	58- 61- 61	60- 71- 71	93- -	96- -
7	57- 59- 59	57- 59- 59	59- 61- 61	60- 71- 71	93- -	96- -
8	58- 60- 60	58- 60- 60	59- 62- 62	61- 74- 74	96- -	99- -
9	59- 61- 61	59- 61- 61	61- 74- 74	71- 96- 96	142- -	- -
10	60- 71- 71	61- 74- 74	71- 96- 96	96- -	- -	- -
11	71- 96- 96	71- 99- 99	96- -	- -	- -	- -

aa-bb-cc

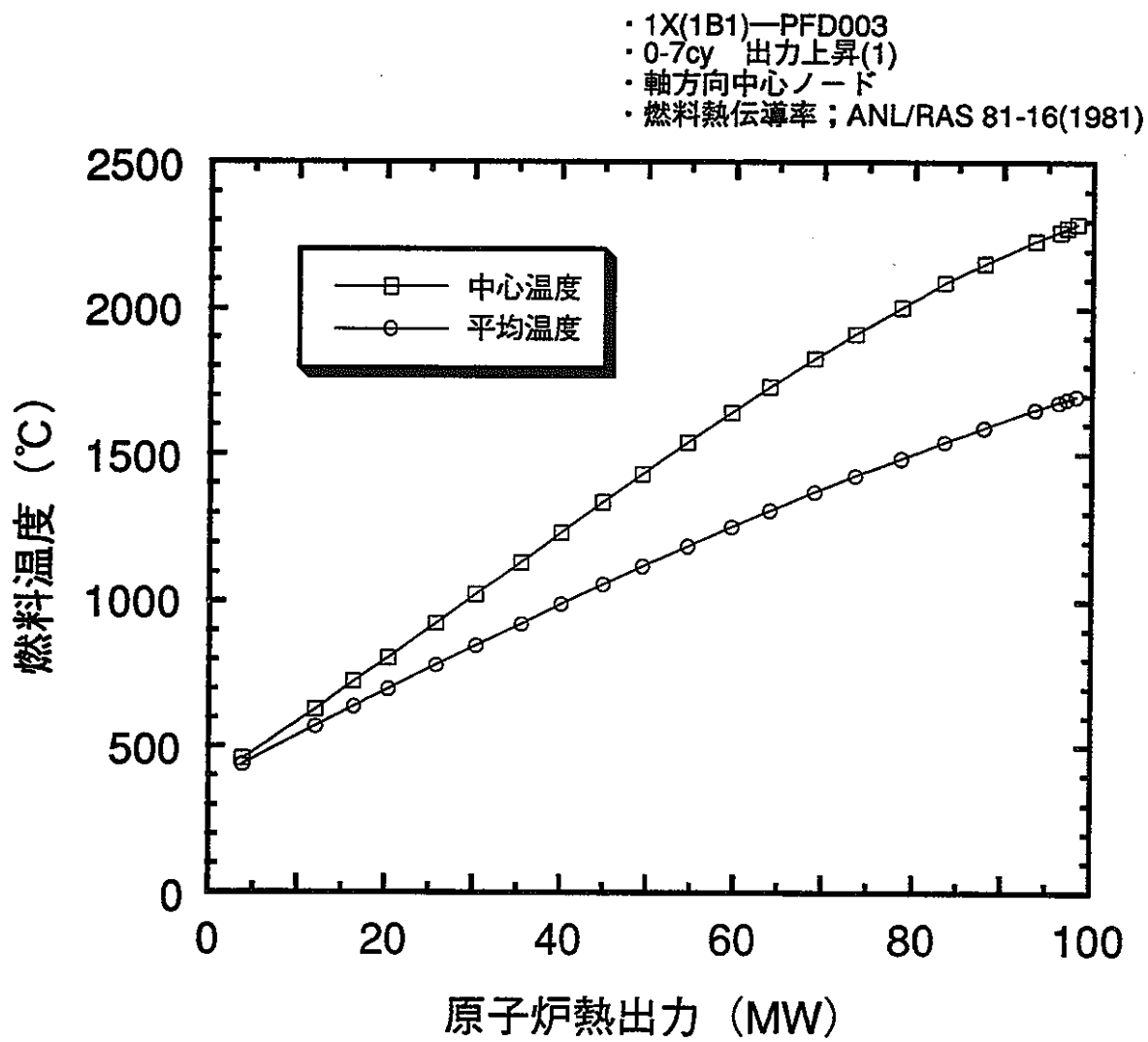
aa; 等軸晶領域の生成ステップ

bb; 柱状晶領域の生成ステップ

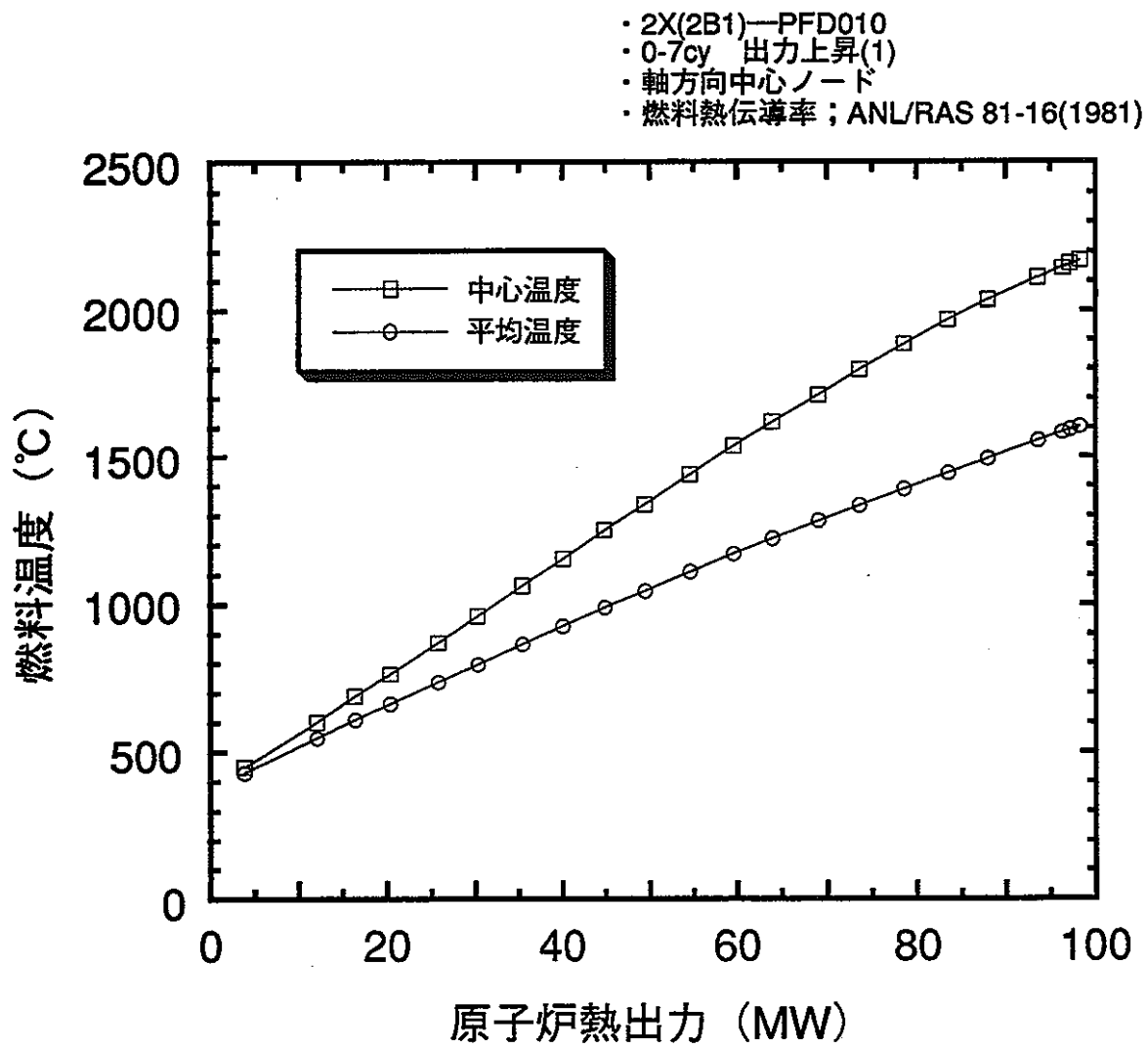
cc; センターボイド領域の生成ステップ



図A.1-1 第0-7サイクル出力上昇における燃料温度変化 (000-PFD001)

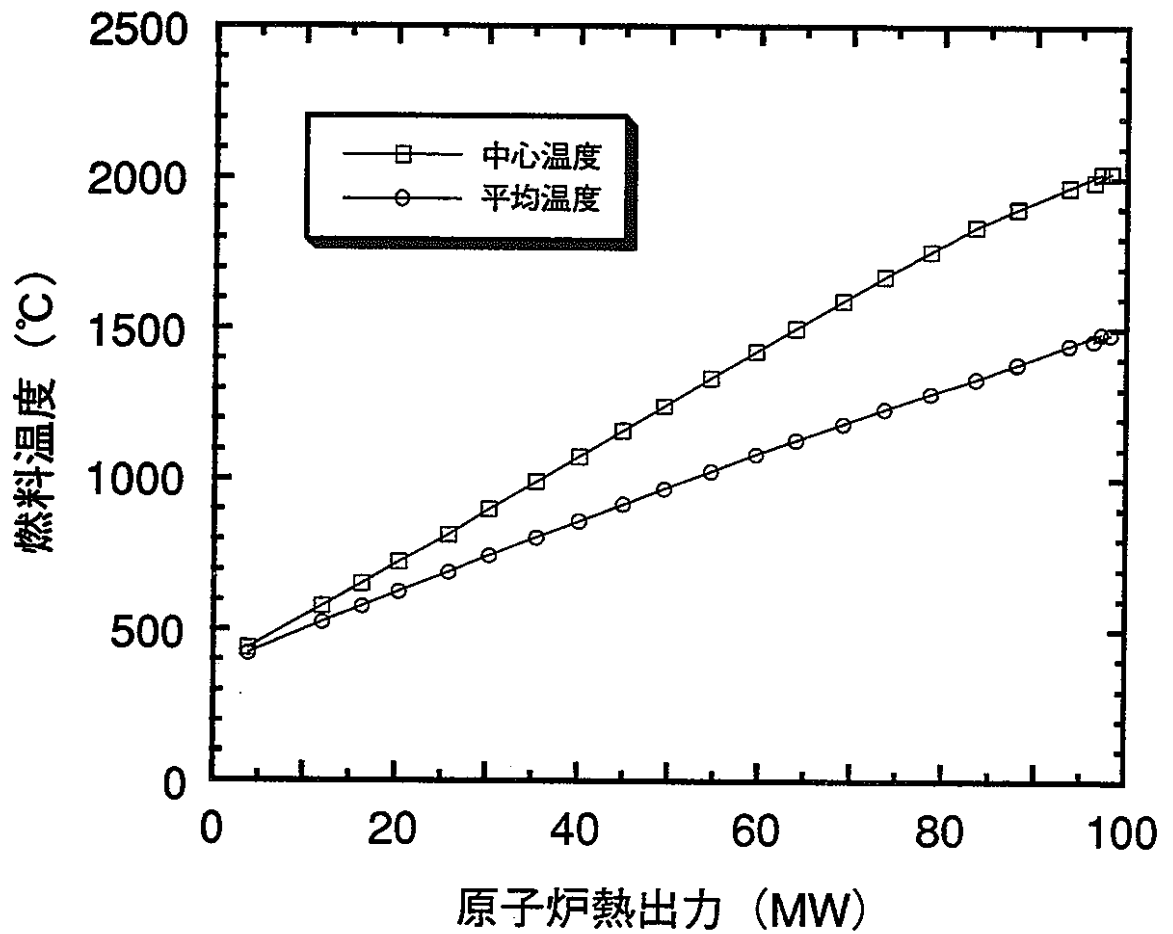


図A.1-2 第0-7サイクル出力上昇における燃料温度変化 (1B1-PFD003)

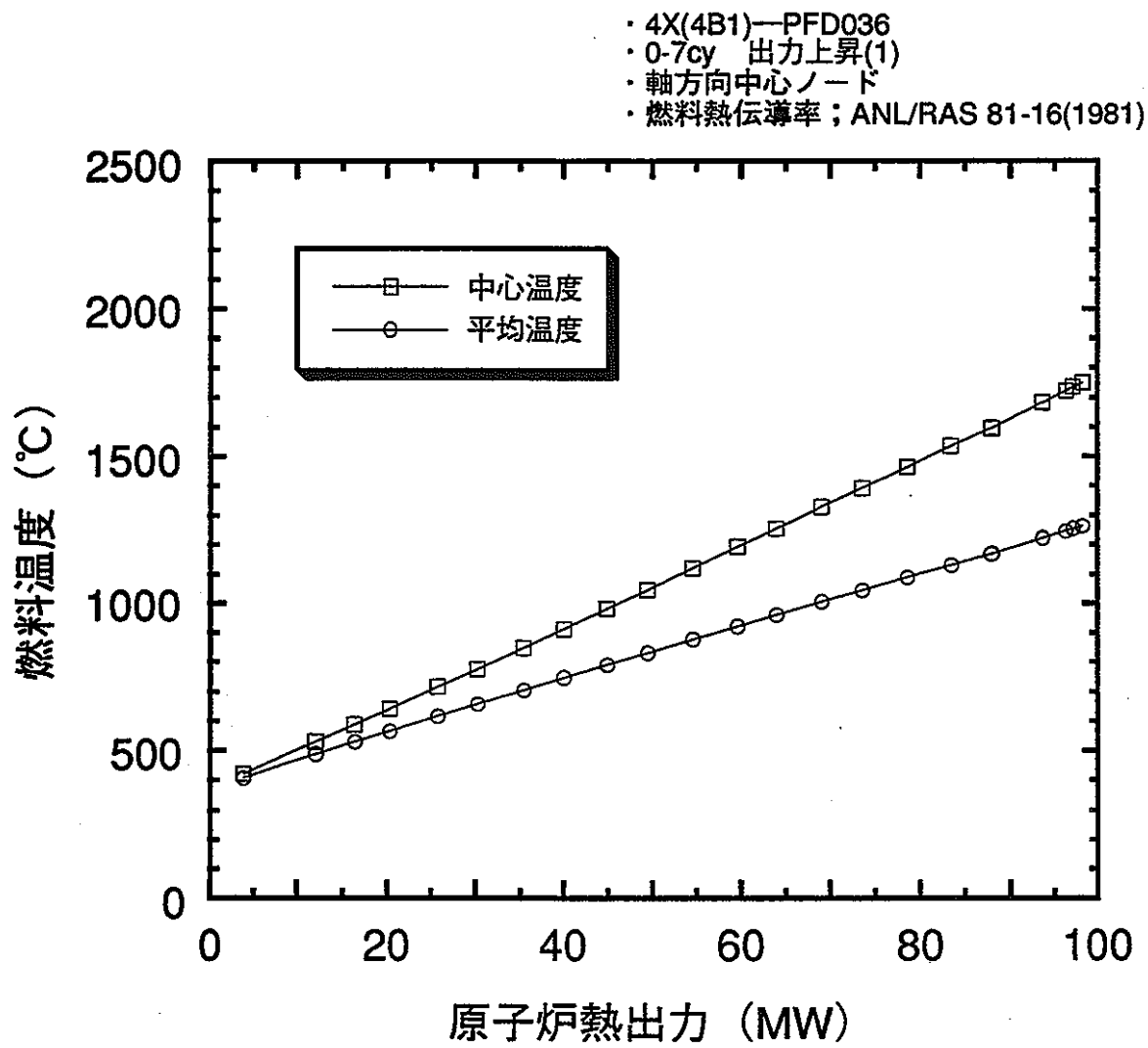


図A.1-3 第0-7サイクル出力上昇における燃料温度変化 (2B1-PFD010)

- ・ 3X(3B1)—PFD022
- ・ 0-7cy 出力上昇(1)
- ・ 軸方向中心ノード
- ・ 燃料熱伝導率；ANL/RAS 81-16(1981)

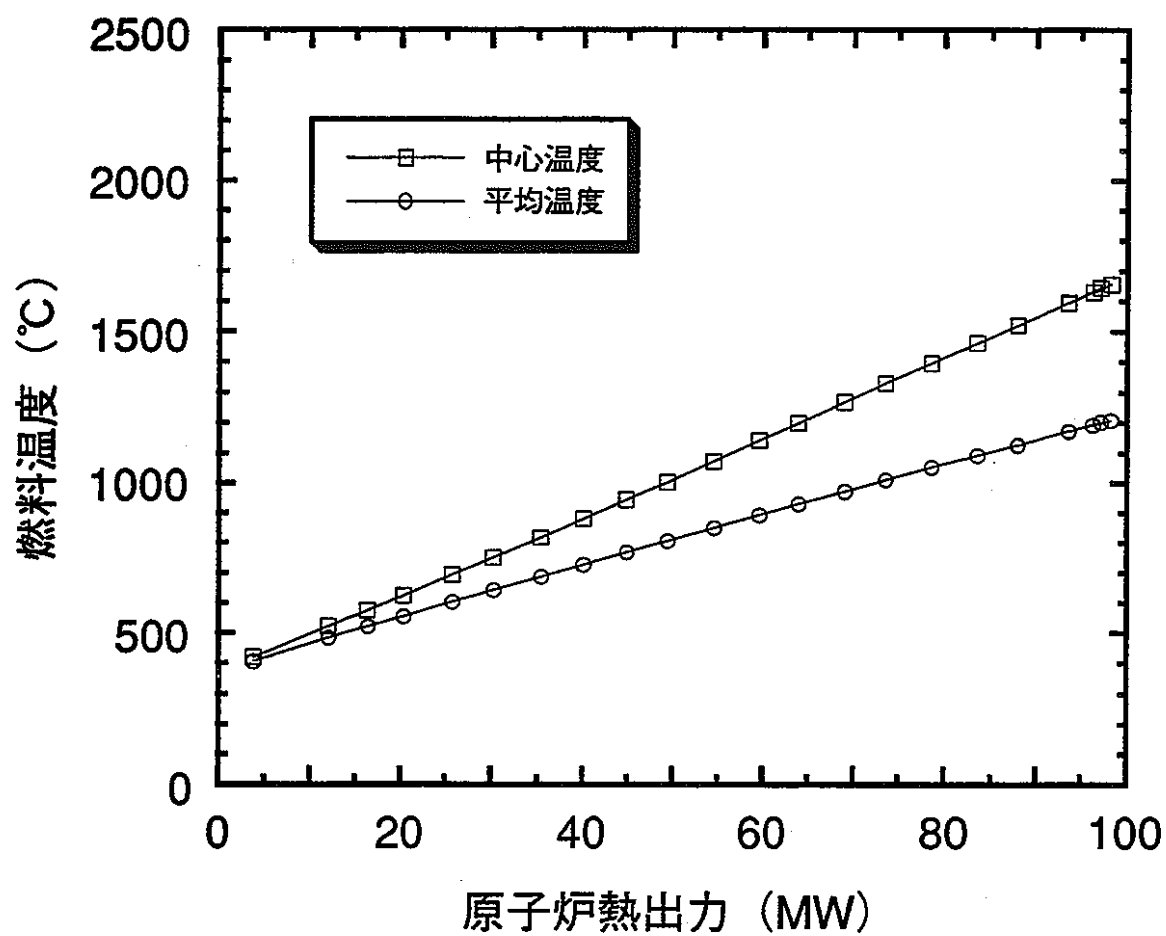


図A.1-4 第0-7サイクル出力上昇における燃料温度変化 (3B1-PFD022)



図A.1-5 第0-7サイクル出力上昇における燃料温度変化 (4B1-PFD036)

- ・ 5X(5B3)—PFD057
- ・ 0-7cy 出力上昇(1)
- ・ 軸方向中心ノード
- ・ 燃料熱伝導率；ANL/RAS 81-16(1981)



図A.1-6 第0-7サイクル出力上昇における燃料温度変化 (5B3-PFD057)