

JAERI - M
92-031

ナトリウム冷却金属燃料高速炉用
炉心過渡挙動解析コード
— EXCURS の改造と解析例 —

1992年3月

岡嶋 成晃・軍司 康義*・向山 武彦

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1992

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 いばらき印刷機

ナトリウム冷却金属燃料高速炉用炉心過渡挙動解析コード
-EXCURSの改造と解析例-

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部
岡嶋 成晃 ・ 軍司 康義* ・ 向山 武彦

(1992年2月4日受理)

Na冷却酸化物燃料高速炉用炉心過渡挙動解析コード「EXCURS」を、Na冷却金属燃料高速炉 (LMR) に適用できるように改造を行った。

改造の妥当性を確認するために、ANLで行ったEBR-IIでの過渡試験解析結果や電中研で行った1000MWe級金属燃料高速炉の過渡特性解析結果と改造「EXCURS」の解析結果とを比較した。その結果、全般的に改造「EXCURS」の解析結果と他の解析結果は良い一致を示し、改造「EXCURS」がLMRの炉心過渡現象を予測するのに使用できることが確認できた。

アクチノイド消滅処理専焼炉 (ABR)の設計研究での、安全性の観点から、改造「EXCURS」を用いて、Na冷却金属燃料専焼炉 (M-ABR)の炉心過渡特性解析 (ULOFおよびUTOP解析)を行った。さらに、燃料の熱伝導率やフィードバック反応度係数のATWS解析結果に与える影響について、パラメータサーベイを行った。その結果、フラワリング係数、遅発中性子割合、燃料熱伝導率が燃料最高温度に強く影響することが分かった。

A Computer Code for Analysis of Core Transient Behavior
in a Na-cooled Metal Fuel Fast Reactor
- Modification of the Code EXCURS and Sample Calculation -

Shigeaki OKAJIMA, Yasuyoshi GUNJI* and Takehiko MUKAIYAMA

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

(Received February 4, 1992)

The core transient behavior calculation code "EXCURS" for a Na-cooled oxide fuel fast reactor was modified for the application to a Na-cooled metal fuel fast reactor (LMR).

The results of the core transient behavior calculated with the modified EXCURS were compared with those calculated by ANL for EBR-II and also compared with those by CRIEPI for 1000MWe-LMR. These calculations agreed quite well. The modified EXCURS, therefore, can be used for analysing the core transient behavior of LMR.

In a design study of actinide burner reactors (ABR), the analysis of core transient behavior is important from the viewpoint of safety. The ULOF and UTOP analyses for a Na-cooled metal fuel ABR (M-ABR) were carried out using the modified EXCURS. The effect of heat conductivity of fuel and that of feedback reactivity coefficients on the core transient behavior were also evaluated. It is calculated that the maximum temperature of fuel is strongly affected by flowering reactivity coefficient, delayed neutron fraction and heat conductivity of fuel in this order.

Keywords: Accident Analysis, Transient Behavior, EXCURS Code, FBR, LMR, Actinide Burner Reactor, ATWS, UTOP, ULOF, ULOHS, Reactor Kinetics, Decay Heat Balance

* Kanazawa Computer Service Co. Ltd.

目 次

1. はじめに	1
2. EXCURSの改造	1
2.1. 改造作業	2
2.1.1 冷却材入口温度	2
2.1.2 反応度フィードバック効果	3
2.1.3 その他	3
2.2 改造「EXCURS」の検証	7
2.2.1 EBR-II	7
(1) ANLでの解析手法と改造「EXCURS」の相違	7
(2) ULOF解析	7
(3) ULOHS解析	8
2.2.2 1000MWe級金属燃料高速炉	27
(1) 電中研での解析手法と改造「EXCURS」の相違	27
(2) ULOF解析	28
(3) UTOP解析	29
2.3 まとめ	48
3. Na冷却金属燃料専焼炉(M-ABR)におけるATWS解析	49
3.1 Na冷却金属燃料専焼炉(M-ABR)	49
3.2 ATWS解析	49
3.2.1 ULOF解析	49
3.2.2 UTOP解析	50
3.3 物性値及び温度係数等の解析結果への影響	50
4. まとめ	68
謝 辞	69
参考文献	69
付録 改造「EXCURS」のマニュアル	70

Contents

1. Introduction	1
2. Modification of EXCURS	1
2.1 Modified Parts in EXCURS	2
2.1.1 Coolant Inlet Temperature	2
2.1.2 Reactivity Feedback Effects	3
2.1.3 Other Modifications	3
2.2 Validation of the Modified EXCURS	7
2.2.1 EBR-II Core	7
(1) Comparison of Analysis Methods between ANL and EXCURS ..	7
(2) ULOF Analysis	7
(3) ULOHS Analysis	8
2.2.2 1000MWe Metal Fuel Fast Reactor	27
(1) Comparison of Analysis Methods between CRIEPI and EXCURS	27
(2) ULOF Analysis	28
(3) UTOP Analysis	29
2.3 Summary	48
3. ATWS Analysis in a Na-cooled Metal Fuel Actinide Burner Reactor	49
3.1 Na-cooled Metal Fuel Actinide Burner Reactor (M-ABR)	49
3.2 ATWS Analysis	49
3.2.1 ULOF Analysis	49
3.2.2 UTOP Analysis	50
3.3 Effect of Heat Conductivity of Fuel and Effect of Feedback Reactivity Coefficients on the Core Transient Behavior	50
4. Summary	68
Acknowledgements	69
References	69
Appendix User's Manual of the Modified EXCURS	70

1. はじめに

高レベル廃棄物管理の一つの方策として群分離・消滅処理が有り、オメガ計画のもとでその技術開発が進められている。高レベル廃棄物に含まれるマイナーアクチノイド(Np, Am, Cm等)に対する消滅処理システムとしては種々考えられるが、原研では原子炉を用いた消滅処理システムとして、マイナーアクチノイドを燃料の主要な成分として硬い中性子エネルギースペクトルを有する専焼炉の概念を検討してきた。これまでの概念検討の結果、Na冷却金属燃料専焼炉とHe冷却粒子燃料専焼炉の概念を得た。¹⁾ これらの専焼炉では、マイナーアクチノイドが燃料の主要成分であり、又、中性子スペクトルが硬いため実効遅発中性子割合がこれまでの高速炉に比べて小さく、中性子平均寿命が短いので動特性上の問題がある。そこで、安全性の観点から過渡特性解析、とりわけ仮想事故解析(ATWS)を行い、炉心成立性の検討を行なうことが重要になる。

高速炉の過渡特性解析は、金属燃料高速炉等を対象とした汎用の過渡特性解析コードは殆ど見あたらない。従って、専焼炉の過渡特性解析を行なうに当たり、解析コードの整備が必要となる。そのため、Na冷却酸化物燃料高速炉用炉心過渡挙動解析コード「EXCURS」²⁾を、金属燃料高速炉に適用できるように改造した。

改造の妥当性を検証するために、米国アルゴンヌ国立研究所(ANL)が金属燃料高速炉EBR-II(63MWth)で実施した過渡特性実験およびその解析³⁾と本改造コードによる解析結果とを比較した。また、電力中央研究所で行なった1000MWe級金属燃料高速炉の過渡特性解析結果⁴⁾とも比較した。改造の妥当性を確認後、Na冷却金属燃料専焼炉の過渡特性解析を行なった。

本報告では、第2章においてEXCURSの改良について、第3章ではNa冷却金属燃料専焼炉のATWS解析結果について述べる。改良「EXCURS」のマニュアルについては、付録に示した。

2. EXCURSの改造

Na冷却酸化物燃料高速炉用炉心過渡挙動解析コードEXCURSは、炉心を燃料、被覆管、冷却材及び構造材から成る単位セル(チャンネル)で代表して、その過渡挙動を解析するコードである。チャンネルは平均チャンネル、ホットチャンネル、及びホットテストチャンネルから成る。平均チャンネルでは出力密度、冷却材流速とも全炉心の平均値を用い、ホットチャンネルでは炉心の最高出力密度及び任意の流速を、ホットテストチャンネルではホットチャンネルに更に工学的ホットチャンネル係数を考慮に入れて計算する。

炉心の核分裂による出力挙動は、遅発中性子6群の1点炉動特性方程式により計算する。また、本コードでは反応度の外乱およびスクラムによる制御棒効果を取り入れることができる。反応度のフィードバック効果としては、ドップラー効果、燃料軸方向熱膨張、被覆管熱膨張、冷却材密度変化、構造材熱膨張等による効果を考慮でき、これらの反応度は平均チャンネルの温度(すなわち全炉心の平均値)

1. はじめに

高レベル廃棄物管理の一つの方策として群分離・消滅処理が有り、オメガ計画のもとでその技術開発が進められている。高レベル廃棄物に含まれるマイナーアクチノイド(Np, Am, Cm等)に対する消滅処理システムとしては種々考えられるが、原研では原子炉を用いた消滅処理システムとして、マイナーアクチノイドを燃料の主要な成分として硬い中性子エネルギースペクトルを有する専焼炉の概念を検討してきた。これまでの概念検討の結果、Na冷却金属燃料専焼炉とHe冷却粒子燃料専焼炉の概念を得た。¹⁾ これらの専焼炉では、マイナーアクチノイドが燃料の主要成分であり、又、中性子スペクトルが硬いため実効遅発中性子割合がこれまでの高速炉に比べて小さく、中性子平均寿命が短いので動特性上の問題がある。そこで、安全性の観点から過渡特性解析、とりわけ仮想事故解析(ATWS)を行い、炉心成立性の検討を行なうことが重要になる。

高速炉の過渡特性解析は、金属燃料高速炉等を対象とした汎用の過渡特性解析コードは殆ど見あたらない。従って、専焼炉の過渡特性解析を行なうに当たり、解析コードの整備が必要となる。そのため、Na冷却酸化物燃料高速炉用炉心過渡挙動解析コード「EXCURS」²⁾を、金属燃料高速炉に適用できるように改造した。

改造の妥当性を検証するために、米国アルゴンヌ国立研究所(ANL)が金属燃料高速炉EBR-II(63MWth)で実施した過渡特性実験およびその解析³⁾と本改造コードによる解析結果とを比較した。また、電力中央研究所で行なった1000MWe級金属燃料高速炉の過渡特性解析結果⁴⁾とも比較した。改造の妥当性を確認後、Na冷却金属燃料専焼炉の過渡特性解析を行なった。

本報告では、第2章においてEXCURSの改良について、第3章ではNa冷却金属燃料専焼炉のATWS解析結果について述べる。改良「EXCURS」のマニュアルについては、付録に示した。

2. EXCURSの改造

Na冷却酸化物燃料高速炉用炉心過渡挙動解析コードEXCURSは、炉心を燃料、被覆管、冷却材及び構造材から成る単位セル(チャンネル)で代表して、その過渡挙動を解析するコードである。チャンネルは平均チャンネル、ホットチャンネル、及びホットテストチャンネルから成る。平均チャンネルでは出力密度、冷却材流速とも全炉心の平均値を用い、ホットチャンネルでは炉心の最高出力密度及び任意の流速を、ホットテストチャンネルではホットチャンネルに更に工学的ホットチャンネル係数を考慮に入れて計算する。

炉心の核分裂による出力挙動は、遅発中性子6群の1点炉動特性方程式により計算する。また、本コードでは反応度の外乱およびスクラムによる制御棒効果を取り入れることができる。反応度のフィードバック効果としては、ドップラー効果、燃料軸方向熱膨張、被覆管熱膨張、冷却材密度変化、構造材熱膨張等による効果を考慮でき、これらの反応度は平均チャンネルの温度(すなわち全炉心の平均値)

に基づいて評価する。核分裂生成物の崩壊熱による出力は、崩壊熱の式により計算する。

熱計算については、冷却材領域に対して、平均チャンネル内の隣接するノード間での熱伝導を考慮するが、その他の領域（燃料領域や被覆管領域等）については、熱伝導を考慮しない。物性値の温度依存については、温度に関する2次式で近似し、さらに燃料の溶融過程についても考慮することができる。

A T W S 解析の代表的な例としては、

- ① U L O F (Unprotected Loss of Flow) : 外部電源喪失時にスクラムが失敗する流量低下型 A T W S。1次系の冷却材流量が低下する事により、流量と出力のミスマッチを生じる。
- ② U T O P (Unprotected Transient over Power) : 制御棒の誤引き抜き時にスクラムが失敗する反応度挿入型 A T W S。反応度挿入により出力の上昇を生じるが、1次系の冷却材流量は確保されている。
- ③ U L O H S (Unprotected Loss of Heat Sink) : 中間熱交換器 (I H X) や蒸気発生器 (S G) の故障等により炉心で発生した熱の除去が出来ない時にスクラムが失敗する除熱源喪失型 A T W S。

の3つがある。

金属燃料高速炉において上記 A T W S 過渡特性解析を行うために、「E X C U R S」を以下に関して改造した：

- ① 従来の「E X C U R S」では、冷却材炉心入口温度の時間変化は、数値入力データとして予め用意しなければならない。したがって、計算で得た炉心出口温度を炉心入口温度へフィードバックするのは困難である。そこで、この冷却材温度フィードバックを考慮するために、冷却材が原子炉内で循環する経路をモデル化して、各部の温度変化を計算するようにする。
- ② 金属燃料高速炉の U L O H S 解析では、炉心下部支持板径方向膨張による反応度効果が大きいとの報告もある⁵⁾ことから、新たに反応度フィードバック効果として炉心下部支持板径方向熱膨張や制御棒-炉心相対変位 (C R D L) 等の反応度効果も考慮できるように改良する。

改造前後の計算モデルを図 2.1 に示し、以下に、改造点について詳述する。

2. 1 改造作業

2.1.1 冷却材入口温度

従来の「E X C U R S」では、冷却材炉心入口温度の時間変化は、炉心出力の関数としてまたは時間の関数として、予め数値入力しなければならない。したがって、冷却材炉心出口温度変化による入口温度への影響を考慮することは困難である。この考慮は、A T W S 解析（特に冷却材流量の減少を伴わない U T O P や U L O H S 解析）を実施する場合に、必須である。そこで、E B R - II 炉心やタンク型炉心に対して、図 2.1 に示すように、炉心から出た冷却材が経由する循環経路（パイプ、中間熱交換器、ホットプール及びコールドプール等）をモデル化

して、冷却材循環経路各部での冷却材温度変化を順次計算して、冷却材炉心入口温度を求めるようにする。このようにして、冷却材炉心入口温度へ炉心出口温度変化がフィードバックできるように改良した。ただし冷却材循環経路における配管（1次系および2次系を含む）での熱の移動は無視した。

2.1.2 反応度フィードバック効果

従来の「EXCURS」では、ドップラー効果、燃料軸方向膨張、被覆管膨張、冷却材密度変化、構造材膨張による効果を反応度フィードバックとしている。これらの反応度フィードバックの計算は、平均チャンネルの温度に基づいて評価する。本改造では、上述の反応度フィードバックに加えて表2.1に示す項目を追加した。なお、反応度を導出する際に使用する温度点を併せて表に示す。

2.1.3 その他

上記の改造に加えて、以下の項目について追加・改造を行った。

(1) 核分裂生成物による崩壊熱計算の改造

従来の「EXCURS」では、核分裂生成物による崩壊熱の計算を炉心出力の関数、もしくは時間毎の値としてテーブル形式で入力している。

今回、ORIGEN-2の核データライブラリー（LM-FBR用の ^{235}U ）⁶⁾を参考に、核分裂生成物を18種の半減期群にグループ化し、各群の核分裂生成物割合を求めた（表2.2を参照）。この割合を基に、以下の式を用いて核分裂生成物の崩壊による熱出力を求めるようにした。

<核分裂生成物の崩壊熱計算>

時刻 t における熱出力 $P(t)$ は、

$$P(t) = P_0 \cdot \{n(t) \cdot E_f + (1 - E_f) \cdot \sum \lambda_i \gamma_i\} \quad (2.1)$$

P_0 : 出力換算係数

$n(t)$: 時刻 t における核分裂率

E_f : 核分裂出力の割合

$\gamma_i(t)$: 時刻 t における i 群目の核分裂生成物密度

λ_i : i 群目の崩壊定数

と表せる。

いま、時刻 t における i 群目の核分裂生成物密度 $\gamma_i(t)$ を、

$$\frac{d}{dt} \gamma_i(t) = E_i \cdot n(t) - \lambda_i \cdot \gamma_i(t) \quad (2.2)$$

$\gamma_i(t)$: 時刻 t における i 群目の核分裂生成物密度

E_i : 核分裂生成物の i 群になる割合

$n(t)$: 時刻 t における核分裂率

λ_i : i 群目の崩壊定数

とすると、差分方程式に変形して、時刻 t における核分裂生成物の密度は(2.3)式と表せる。

$$\gamma_i(t + \Delta t) = (1 - \Delta t \cdot \lambda_i) \cdot \gamma_i(t) + E_i \cdot n(t) \cdot \Delta t \quad (2.3)$$

(2.3)式を(2.1)式に代入して、熱出力を計算する。

(2) 金属燃料高速炉への適用

従来の「EXCURS」は酸化物燃料高速炉を対象にした計算コードである。これを金属燃料高速炉に適用できるように以下の改造を行った。

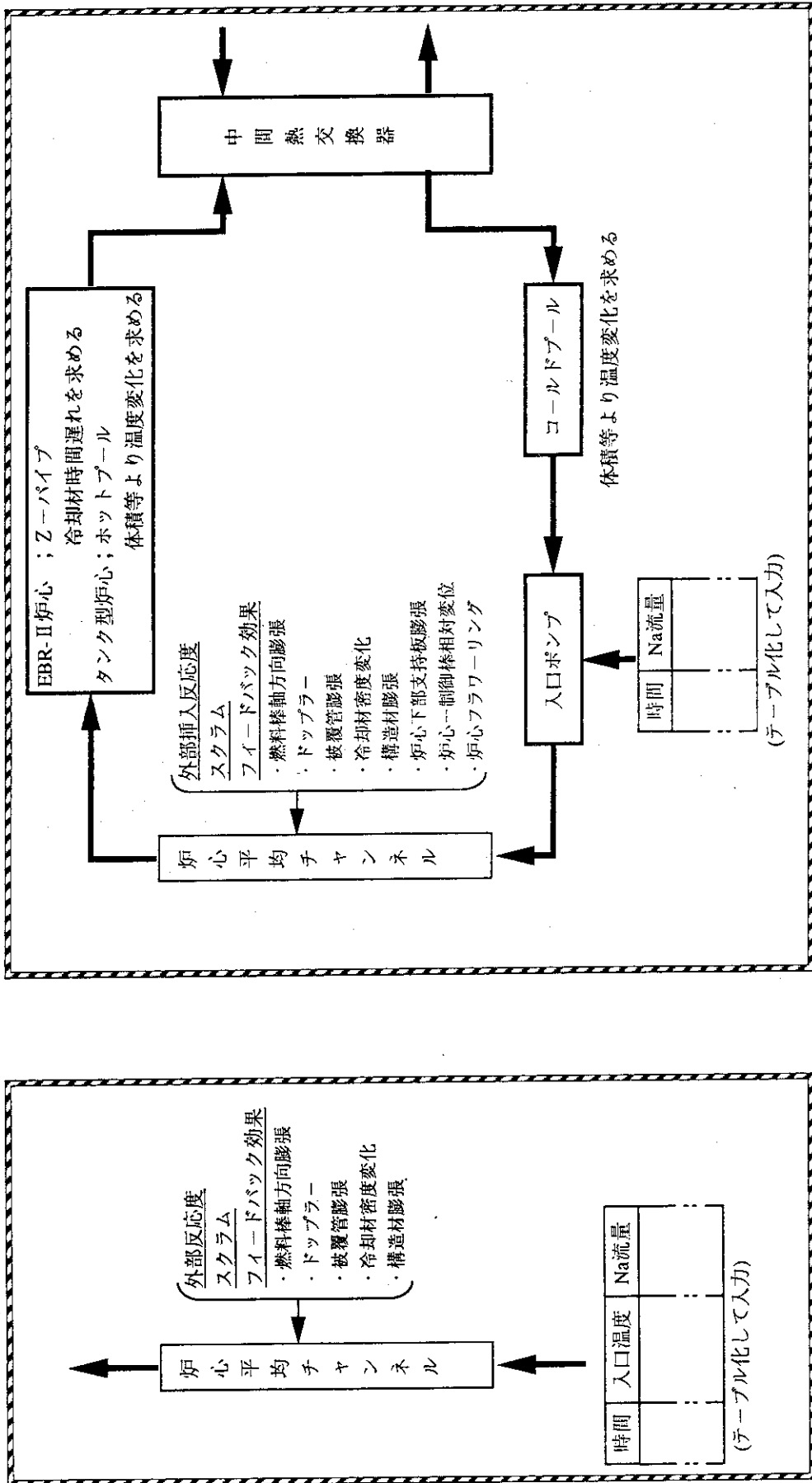
- ① 金属燃料高速炉での物性値（熱伝導率、比熱、密度）の温度依存性を考慮（計算式による導入）。
- ② 燃料と被覆管とのNaギャップを考慮した熱伝達式の導入。

表 2.1 改造により追加したフィードバック反応度係数

反応度係数の種類	反応度導出に用いる温度点
制御棒延長棒の膨張	炉心部冷却材と冷却材炉心出口温度
炉心下部支持板の膨張	冷却材入口温度（炉心下部支持板）
炉心フラワリング	炉心部冷却材温度
上部反射体内Na密度	炉心出口温度
炉心下部温度上昇	炉心入口温度
径方向反射体	(出力)/(冷却材流れ)の変化より推定
径方向ブランケット	同上

表 2.2 核分裂生成物の18群崩壊定数と各群の生成割合

群	半減期(sec)	平均半減期(sec)	λ (1/sec)	$100 \times E_i$	
1	0.05~	0.1	0.0997	6.95192	0.0196
2	~	0.2	0.1612	4.29899	0.0413
3	~	0.4	0.2578	2.68841	3.17
4	~	1.	0.7484	0.926148	2.70
5	~	2.	1.356	0.511146	7.09
6	~	4.	2.731	0.253820	7.40
7	~	8.	5.346	0.129652	11.57
8	~	16.	11.25	0.061623	9.37
9	~	32.	22.96	0.030191	11.25
10	~	64.	44.90	0.015436	10.80
11	~	100.	78.79	0.0087978	3.91
12	~	200.	160.6	0.00431621	5.12
13	~	400.	240.3	0.00288501	3.53
14	~	600.	487.1	0.00142291	2.57
15	~	1200.	747.4	0.00088031	7.12
16	~	2400.	1489.5	0.000465353	1.39
17	~	4800.	2901.9	0.000238856	4.90
18	4800.~	22356.0	0.000031005		8.05
合計					100.00



a) 従来の「EXCURS」モデル

b) 改良「EXCURS」モデル

改造前後の「EXCURS」における解析モデル

図 2.1

2. 2 改造「EXCURS」の検証

2.2.1 EBR-II

EBR-II は金属燃料をドライバー燃料（組成はウランと核分裂生成物中に含まれる貴金属との合金;U-5Fs）とする熱出力62.5MW、電気出力20MWのタンク型ナトリウム冷却高速増殖実験炉である。EBR-IIは金属燃料のみならず酸化物、炭・窒化物などのセラミックス燃料を含む燃料の照射健全性・過渡時健全性試験施設として活用され、数多くの安全特性試験が行われている。EBR-IIで行われた種々の試験の中から、試験番号SHRT45（ULOF試験）³⁾および試験番号B302（ULOHS試験）³⁾について改造「EXCURS」を用いて解析し、EBR-IIでの実験値及びANLで行った解析結果³⁾と比較した。なお、解析に使用したEBR-IIの温度係数等³⁾を表2.2.1、主要な炉心構造等を表2.2.2、及び一次冷却系の様子を図2.2.1にそれぞれ示す。

(1) ANLでの解析手法と改造「EXCURS」の相違

ANLで行っているEBR-IIでの安全性試験の解析では、本解析のために開発された「NATDEMO」⁷⁾を用いてプラント全体の動特性および熱水力挙動解析を行う。この計算結果を入力として、ホットチャンネル解析コード「HOTCHAN」^{7)・8)}により、個々の集合体の詳細な熱水力挙動を計算している。ANLの解析モデルと本解析モデル（図2.1参照）の相違を次に述べる。

- ① 解析チャンネル：ANLでは全炉心を3領域（ドライバー、ステンレス、径方向劣化ウランブランケット）に分け各々をモデル化して計算を行っている。これに対して、本解析では、全炉心を1つの領域（チャンネル）で代表させて解析を行っている。
- ② 主循環ポンプ：炉容器内にある2つの主循環ポンプをANLでは各々モデル化している。これに対して本解析では、主循環ポンプ1基とモデル化した。
- ③ IHX 2次系以降：ANLでは中間熱交換器（IHX）2次系以降の熱移動（蒸気系も含む）を考慮に入れている。これに対して本解析ではこれを無視している。
- ④ その他の熱移動：ANLではシャットダウンクーラー（閉じている状態で約120kW、全開時で350kWの除熱性能がある。これは全出力62.5MWtの約0.6%に相当）、炉容器から外部への熱移動（約250kW）、主タンクを暖めるヒーター（約600kW）等を考慮に入れている。これに対して本解析ではこれらを無視している。

(2) ULOF解析

外部電源喪失事故を想定したULOF試験の中から、試験番号SHRT45を選び、この解析を行った。SHRT45の試験では、定格運転状態から1次系及び2次系ポンプを同時にトリップさせ、全電源が喪失した状況（ただし、プラント保護のため補助ポンプをバッテリー駆動とし、給水系は作動している）を模擬し、この時の炉心過渡特性を測定している。なお、測定中はスクラムが起きないようにしている。

本解析に用いた解析条件と解析結果及びANLとの比較を以下にまとめる。

解析条件

- ① 1次主循環ポンプ停止までの時間：95秒。

ANLの解析ではポンプコストダウンカーブを入力して、計算コード内で自然循環量と冷却材流量変化を導出して解析している。一方、本解析では、ANLの解析結果で得られた冷却材流量変化を入力データとした。(図2.2.2参照)

- ② 2次循環ポンプ：定格時の104%からトリップ。

本解析では定格時の104%から、1次主循環ポンプの流量変化と同一の時間変化でコストダウンさせた。

解析結果

- ① 反応度変化：図2.2.3
 ② 炉心出口温度変化：図2.2.4
 ③ 炉心出力変化：図2.2.5
 ④ 初期軸方向温度分布と1000秒後の軸方向温度分布：図2.2.6

ただし、図2.2.2～図2.2.5までは比較のため、EBR-IIでの試験結果(ANLの図の△、◇、○記号)およびANLでの解析結果を併せて示した。

ANLの解析結果との比較

解析結果の比較一覧を表2.2.3に示す。各項目毎の概要は、以下の通りである。

- ① 反応度変化：時間変化の様子は良く再現できているが、最大反応度がANLでの解析結果では -0.35% (試験値 -0.34%)であるのに対して、本解析では -0.43% であった。
- ② 炉心出口温度変化：時間変化の様子はANLでの解析と本解析は良く一致している。最大到達温度に関しても、ANLの解析結果では 650°C (試験値 620°C)、本解析値では 643°C と両者は良く一致している。しかし、 $t=1000$ 秒でのANLの解析結果が 470°C (試験値 425°C)であるのに対して、本解析では 490°C と若干高めである。
- ③ 炉心出力変化：時間変化はANLでの解析と本解析は全体に良く一致する。詳しくみると、崩壊熱による出力は一致するのに対して、核分裂による出力は $t=1000$ 秒でANLが 5% (試験値 3%)であるのに対して、本解析では 1.7% である。

ANLでの解析結果に比べて、本解析結果は全体に温度を高く評価する傾向がある。これは、本解析コードでは、2次系および配管(1次系及び2次系)等での熱移動は無いと仮定したからであると考えられる。

(3) ULOHS解析(B302)

除熱源喪失事故を想定したULOHS試験の中から試験番号B302を選び、こ

の解析を行った。B302の試験では定常状態から、2次ポンプを逆回転させて20秒で定格時の5%まで激減させ、2次流量をほぼ止めた。これにより中間熱交換器での熱交換が出来なくなった状況（炉心から出た冷却材が高温のまま炉心に戻る）を模擬し、この時の炉心過渡挙動特性を測定している。なお、測定中はスクラムが起きないようにしている。

解析条件

- ① 2次流量変化：試験開始直後から20秒にかけて2次流量が定格の5%まで直線的に減少し、20秒後は定格の5%で一定であるとした。

解析結果

- ① 炉心入口・出口温度変化：図2.2.7
 ② I H X 1次系温度変化：図2.2.8
 ③ 主タンク（コールドプール）平均温度変化：図2.2.9
 ④ 炉心出力変化：図2.2.10
 ⑤ 反応度変化：図2.2.11
 ⑥ 初期軸方向温度分布と1000秒後の軸方向温度分布：図2.2.12

ただし、図2.2.7～図2.2.11までは比較のため、EBR-IIでの試験結果（ANLの図の△、◇、○記号）およびANLでの解析結果を併せて示した。

ANLの解析結果との比較

解析結果の比較一覧を表2.2.4に示す。各項目毎の概要は、以下の通りである。

- ① 炉心入口・出口温度変化：入口温度は、ANLの解析結果では345℃（ $t=0$ 秒）および380℃（ $t=1000$ 秒、試験値385℃）であるのに対して、本解析では343℃（ $t=0$ 秒）及び405℃（ $t=1000$ 秒）である。なお、試験及びANLの解析では0秒から300秒で385℃に到達し、その後ほとんど変化が無いのに対して、本解析では0秒から1000秒まで単調増加を示す。
 出口温度は、ANLの解析では485℃（ $t=0$ 秒）及び395℃（ $t=1000$ 秒、試験値390℃）であるのに対して、本解析では442℃（ $t=0$ 秒）及び406℃（ $t=1000$ 秒）である。出口温度の時間変化は、両者とも単調減少を示し、その傾向は一致する。
- ② I H X 1次側温度変化：ANLの解析では、0秒から20秒の間に1次側入口温度は、440℃から1℃程度上昇後、396℃まで単調に減少する。また、1次側出口温度は0秒から20秒にかけてステップ状に急激に上昇して1次側入口温度と等しくなり、その後入口温度と同様の温度変化（単調減少）を示す。一方、本解析では、ANLの解析結果と同様の挙動を示すが、入口および出口温度の漸近値が $t=1000$ 秒で405℃であり、ANLの結果に比べて9℃高い値を示す。
- ③ 主タンク（コールドプール）平均温度変化：ANLでの解析結果では、346℃（ $t=0$ 秒）から単調増加して、378℃（ $t=1000$ 秒）になる。一方、本解析では、342℃（ $t=0$ 秒）からANLの解析結果と同様に単調増加して402℃（ $t=1000$ 秒）に至り、 $t=1000$ 秒でANLの結果より24℃高い値を示す。

- ④ 炉心出力変化：ANLの解析結果に比べて、本解析結果は全体に小さな炉心出力となり、その様子も異なる。ANLの解析結果では、核分裂による出力は $t=500$ 秒まで急激に減少した後、減少の様子が異なり、その勾配が緩やかになる。一方、本解析では、核分裂による出力は $t=1000$ 秒まで指数的な減少をたどる。なお、試験結果は本解析より緩やかではあるが、同様に急激な減少を示し、ANLの解析結果のように途中で減少勾配が変化することは無い。 $t=1000$ 秒での数値を見ると、ANLの解析結果 8%に対して本解析は0.3%である（試験値 2%）。崩壊熱による出力では、 $t=1000$ 秒でANLの解析結果 2%に対して本解析結果は1.2%である。
- ⑤ 反応度変化：ANLの解析結果では、0秒から200秒にかけて -0.08% まで減少後上昇に転じ、 $t=500$ 秒で -0.01% である。それに対して、本解析では0秒から200秒にかけて急激に減少後、減少速度は緩やかになるが、 $t=1000$ 秒まで単調減少を示す（ $t=1000$ 秒の反応度 -0.11% ）。なお、試験結果は、0秒から200秒にかけて -0.09% まで減少後、 -0.04% まで上昇（ $t=900$ 秒）し、その後また減少する。

ULOHs解析の結果は、ANLでの解析結果に比べて全体に温度を高く評価する傾向がある。この傾向は、UTOP解析の場合より顕著である。この傾向は、2次系および配管（1次系及び2次系）等での熱移動は無いと仮定したからと考えられる。また、炉心入口温度変化の様子がANLの解析と異なる結果となったのは、EBR-II炉心特有の炉心構造を考慮したモデルを改造「EXCURS」に取り入れることができないためと考えられる。すなわち、EBR-II炉心は、炉心冷却材取入れ口を2つ有し、ポンプ-1はIHX1次側出口の近くに、またポンプ-2は離れた場所に位置する。この炉心入口温度変化の相違に起因して、反応度変化（特に炉心下部支持板反応度）も十分に再現することが出来なかったと思われる。

表 2.2.1 EBR-II の温度係数

遅発中性子割合 (β)	0.0068
原子炉入口温度	下 記 480°C の 430 評 550 価 450 用 480
出口温度	
冷却材温度	
燃料温度	
被覆管温度	
Naボンド温度	
反応度項目	
ドップラー	$-3.71 \times 10^{-4} Tdk/dT$
燃料軸方向膨張	-2.34
炉心のNa密度	-7.15
制御棒延長棒の膨張	-5.22
炉心支持板の膨張	-10.08
被覆管膨張(+Na排出)	-1.67
Naボンド	-0.24
上部反射体内Na密度	-4.83
炉心下部温度上昇	-4.04
径方向反射体の膨張	-5.77
径方向ブランケット部分	-1.11
合計	-32.77

(電力中央研究所報告, 調査報告:T87028 P31より)

表2.2.2 EBR-IIの炉心構造

炉型	タンク型FBR
電気出力/熱出力	20MWe/62.5MWt
炉容器の大きさ	約8mφ×約8mH
1次冷却材容量	約340 m ³
1次冷却材流量	約485 kg/sec (ポンプ2基)
1次冷却材炉心出/入口温度	473°C/371°C
中間熱交換器 (IHX)	1基
2次冷却材 IHX 出/入口温度	468°C/306°C
蒸気発生器	蒸発器8基、過熱器2基
タービン蒸気条件	438°C、87 kg/cm ²
使用燃料	金属燃料 (U-5Fs)、濃縮度67%
燃料密度	18.2 g/cm ³ (U-19Pu-10Zr時で15.9 g/cm ³)
燃料熱伝導度	33.4 W/m°C (U-19Pu-10Zr時で20.4 W/m°C)
集合体配列ピッチ	58.93mm
集合体長	2332 mm
集合体当り要素数	91
要素配列ピッチ	4.67mm
要素外径	4.42mm
要素長	612 mm
燃料スタック長	343 mm
燃料スミア密度	75.0%TD
FPガスプレナム/燃料容積比	1.1
被覆管材料	SUS316アニール材
要素最大線出力	約270W/cm
高速中性子束	約 2.3×10^{15} n/sec·cm ² (E _n >0.1MeV)

(電力中央研究所報告, 調査報告:T87028 より)

表2.2.3 EBR-IIにおけるULOF試験の解析結果の概要

	試験	ANL解析結果	本解析
試験番号 試験内容	SHRT 45 1次及び2次ポンプの停止。(停止までの時間95sec)		
流量変化	—————	コード内計算	解析条件
反応度変化	40secで最大反応度 -0.34\$	40secと80secで谷 最大反応度-0.35\$	40secと80secで谷 最大反応度-0.43\$
炉心出口 温度変化	最大値 620°C (80sec) 1000secで425°C	最大値650°C (40sec) 1000secで470°C	最大値650°C 1000secで490°C
核分裂出力	1000secで3%	1000secで5%	1000secで1.7%
崩壊熱出力		1000secで1.5%	1000secで1.2%

表2.2.4 EBR-IIにおけるULOHS試験の解析結果の概要

	試験	ANL解析結果	本解析
試験番号 試験内容	B 3 0 2 IHX2次側流量を20secで5%まで激減させる。		
IHX2次側 流量変化	—————	コード内計算	解析条件
炉心入口 温度変化	0sec 345°C ↓ (急激に増加) 300sec 385°C ↓ (殆ど変化無し) 1000sec 385°C	0sec 345°C ↓ (急激に増加) 300sec 385°C ↓ (殆ど変化無し) 1000sec 380°C	0sec 343°C ↓ (急激に増加) 300sec 390°C ↓ (緩やかに増加) 1000sec 405°C
炉心出口 温度変化	0sec 473°C ↓ (急激に減少) 300sec 402°C ↓ (緩やかに減少) 1000sec 390°C	0sec 485°C ↓ (急激に減少) 500sec 405°C ↓ (緩やかに減少) 1000sec 395°C	0sec 442°C ↓ (急激に減少) 300sec 408°C ↓ (緩やかに減少) 1000sec 406°C

表2.2.4 (続き)

	試験	ANL解析結果	本解析
IHX1次入口 温度変化		0sec 440°C ↓ 20sec 441°C ↓ (単調減少) 500sec 402°C ↓ (緩やかに減少) 1000sec 396°C	0sec 440°C ↓ 20sec 445°C ↓ (単調減少) 500sec 407°C ↓ (緩やかに減少) 1000sec 405°C
主タンク 温度変化		0sec 346°C ↓ (単調増加) 1000sec 378°C	0sec 342°C ↓ (単調増加) 1000sec 402°C
核分裂 出力変化	0sec 93% ↓ (単調減少) 500sec 8.5% ↓ (単調減少) 1000sec 2%	0sec 93% ↓ (単調減少) 500sec 13% ↓ (緩やかに減少) 1000sec 8%	0sec 93% ↓ (単調減少) 500sec 7% ↓ (単調減少) 1000sec 0.3%
崩壊熱 出力変化		1000secで2.2%	1000secで1.2%
反応度変化	0sec 0.0\$ ↓ (急激に減少) 200sec -0.088\$ ↓ (単調増加) 500sec -0.06\$ ↓ (単調増加) 800sec -0.04\$ ↓ (900secで山) 1000sec -0.04\$ ↓ (単調減少) 1500sec -0.06\$	0sec 0.0\$ ↓ (急激に減少) 200sec -0.08\$ ↓ (単調増加) 500sec -0.034\$ ↓ (単調増加) 800sec -0.01\$ ↓ 1000sec -0.01\$ ↓ 1500sec -0.014\$	0sec 0.0\$ ↓ (急激に減少) 200sec -0.08\$ ↓ (単調減少) 500sec -0.1\$ ↓ (単調増加) 800sec -0.105\$ ↓ (緩やかに減少) 1000sec -0.11\$

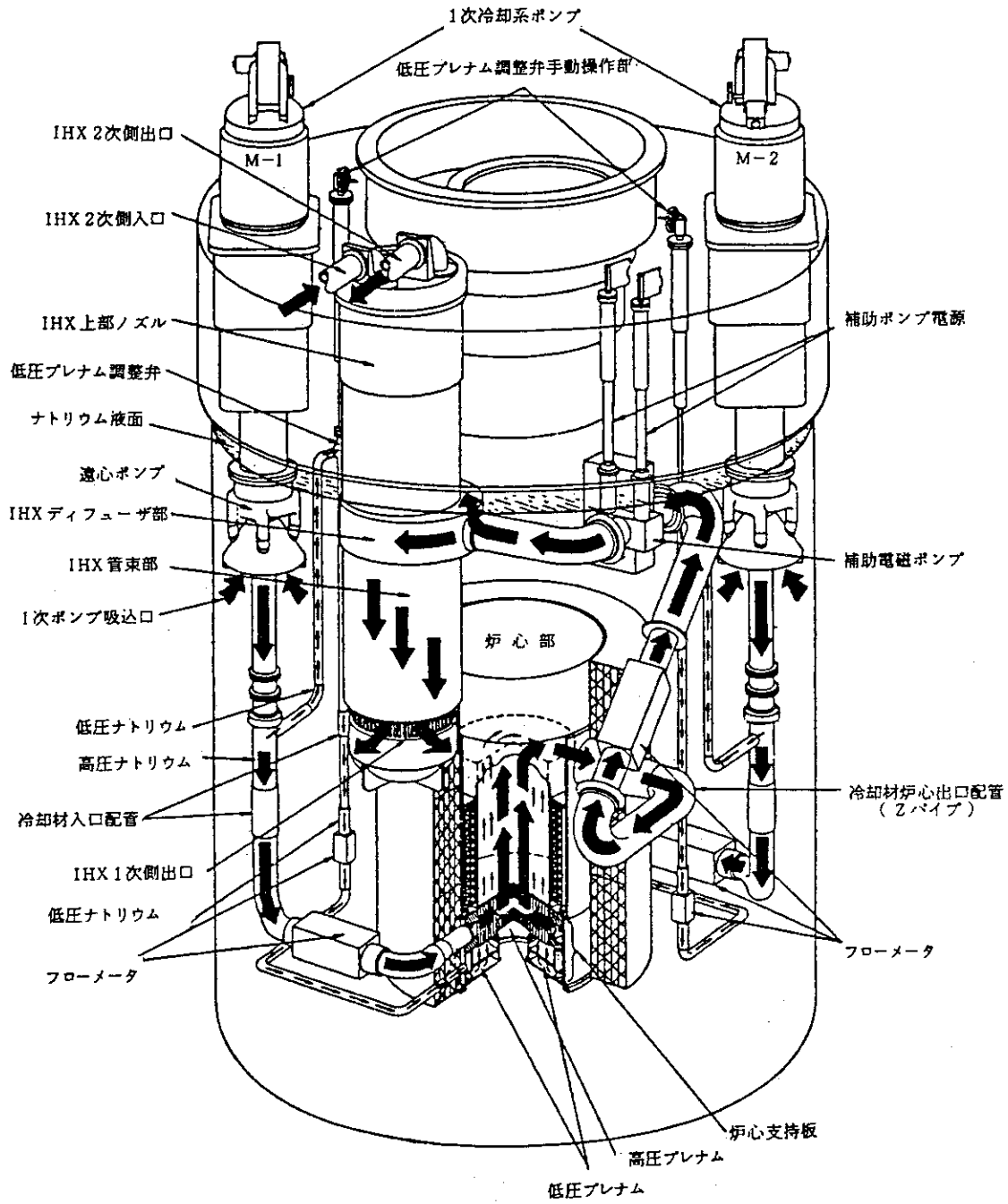


図 2.2.1 EBR-II 炉心の1次冷却系

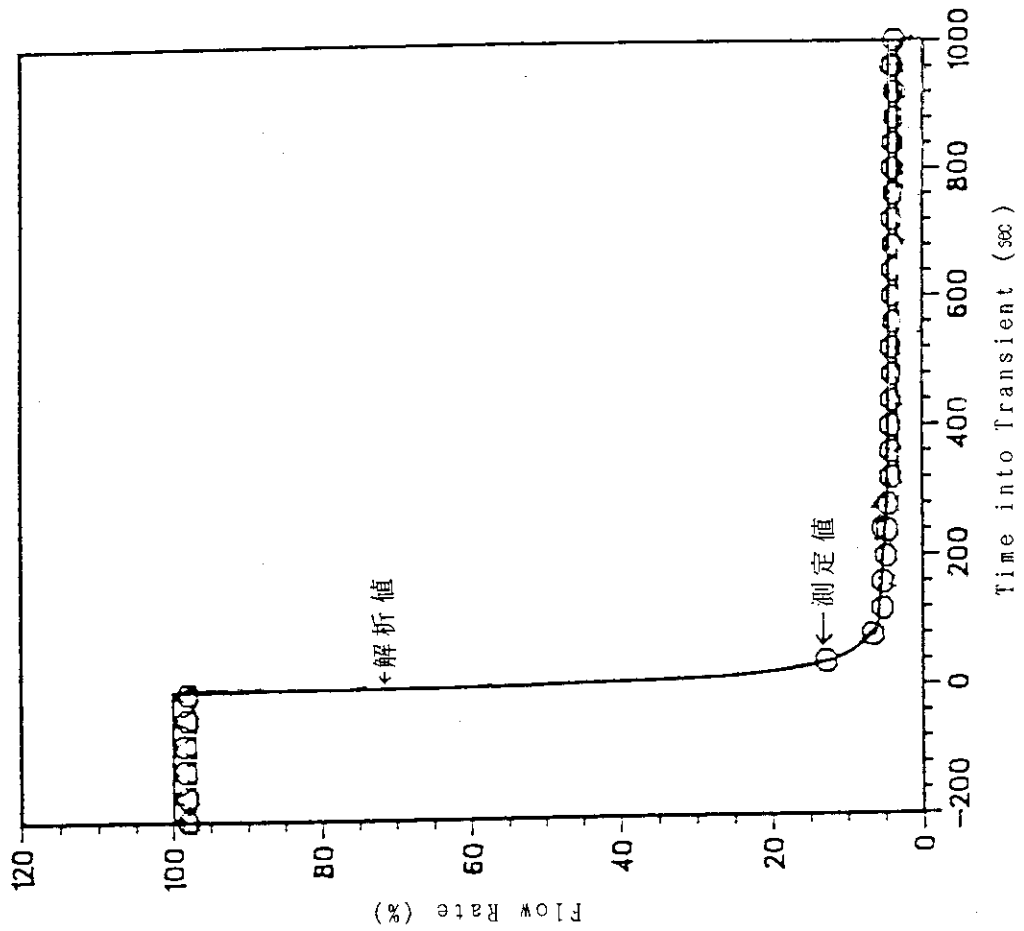
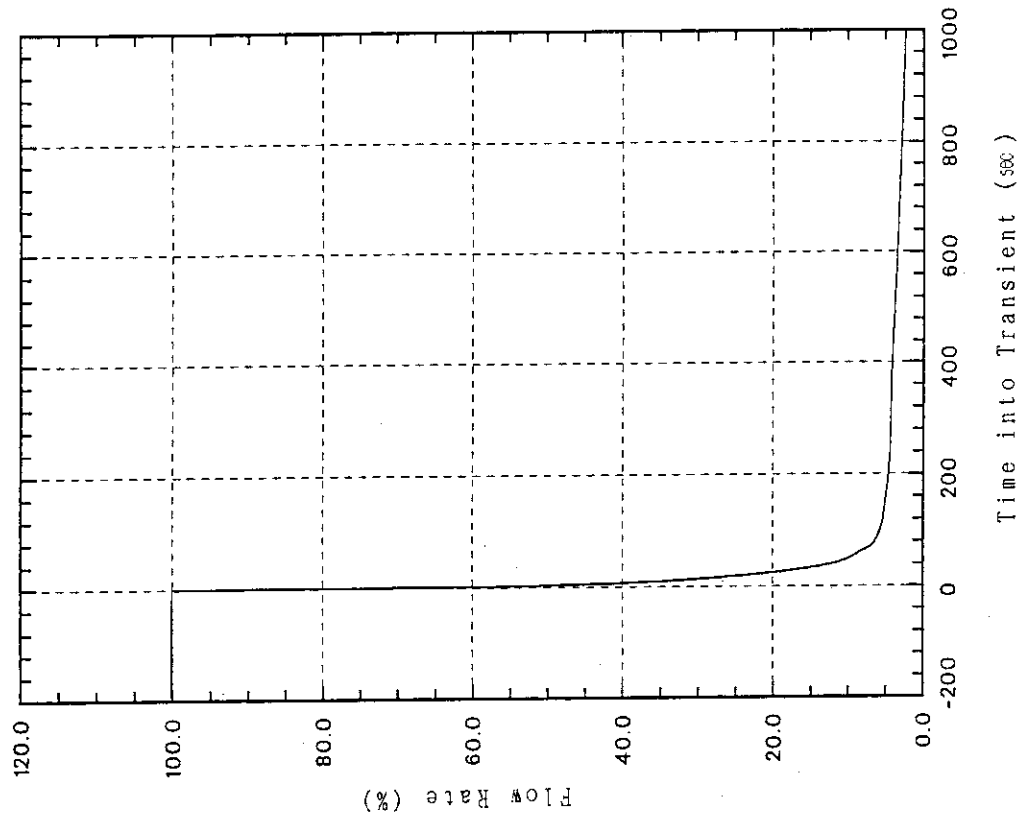


図 2.2.2 EBR-IIでのULOF試験(SHRT45)における冷却材流量変化
 (左図：直線-ANL解析結果 ○-測定値、右図：改造「EXCURS」入力)

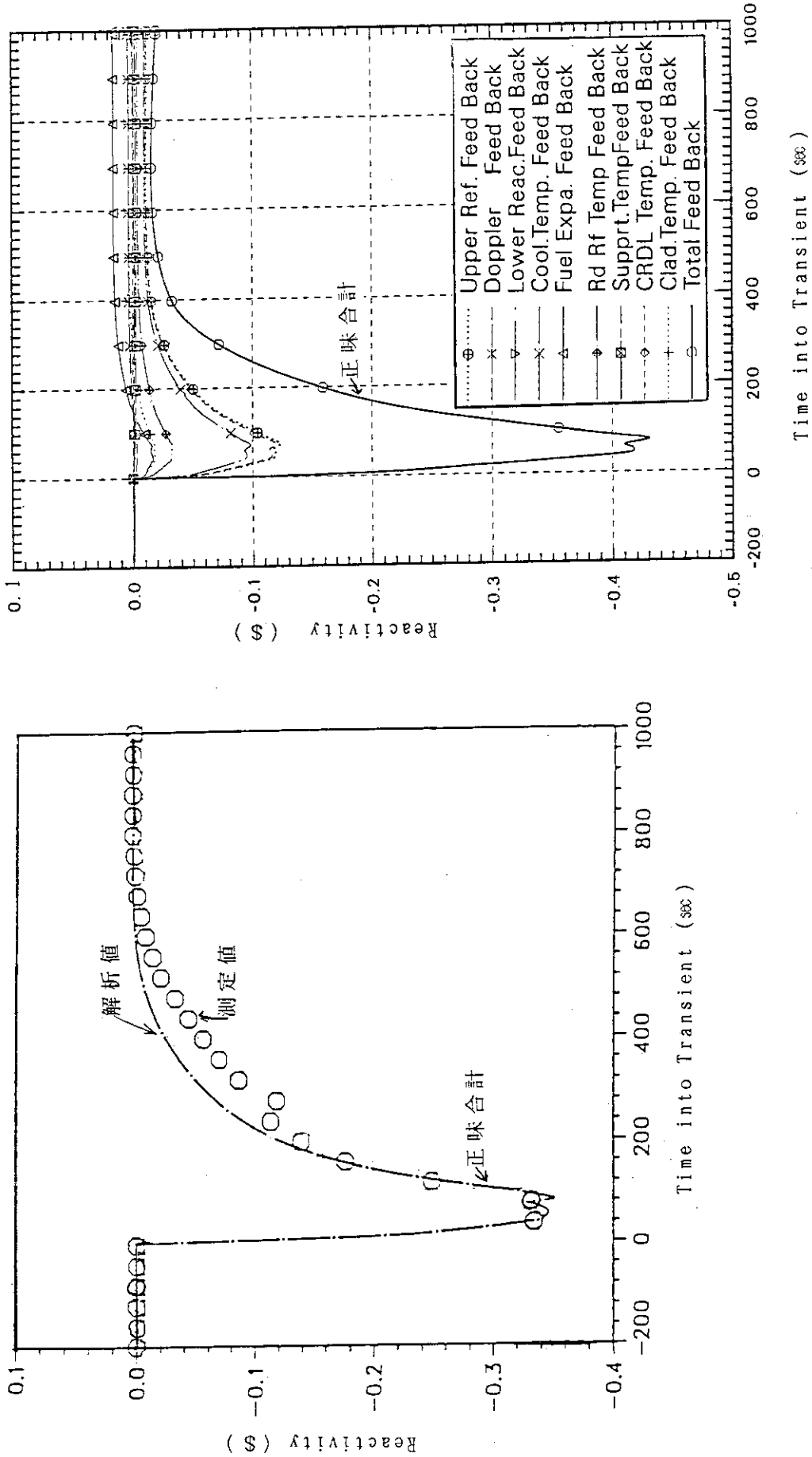


図 2.2.3 EBR-II での ULOF 試験 (SHRT45) における反応度変化
 (左図：直線-ANL 解析結果 ○-測定値、右図：改造「EXCURS」)

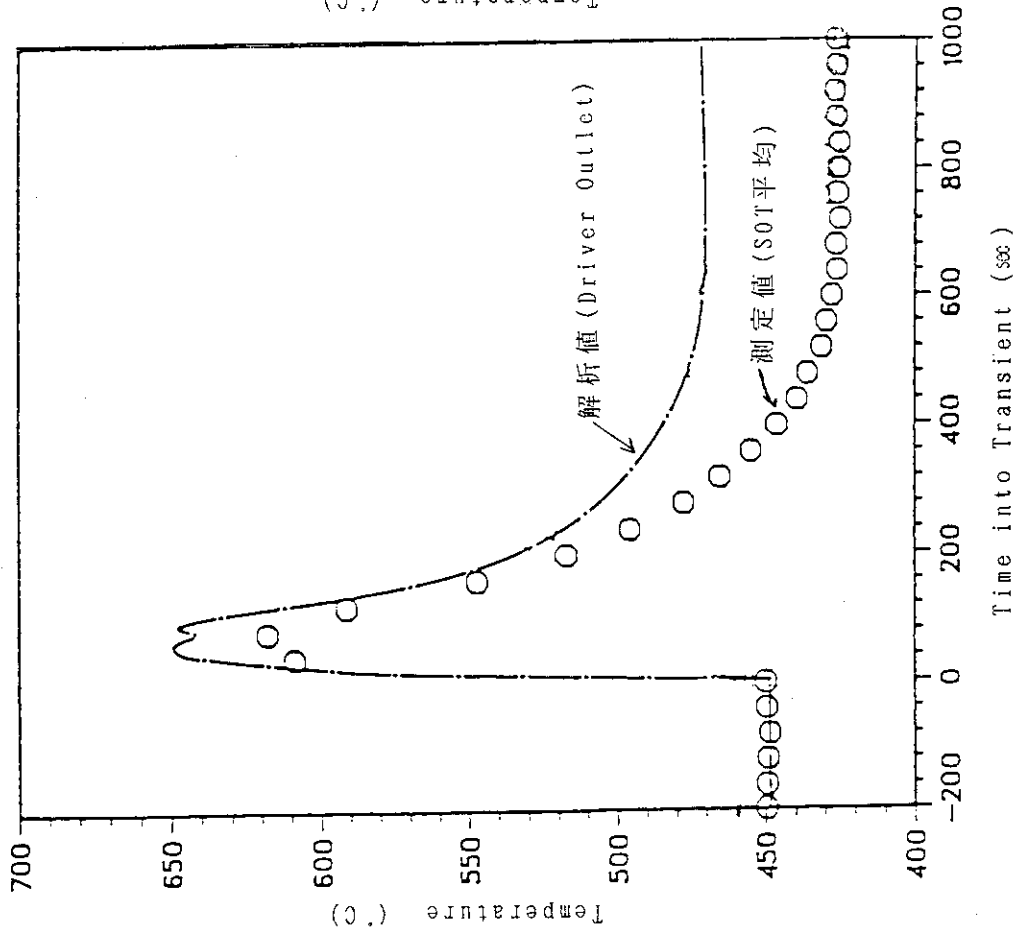
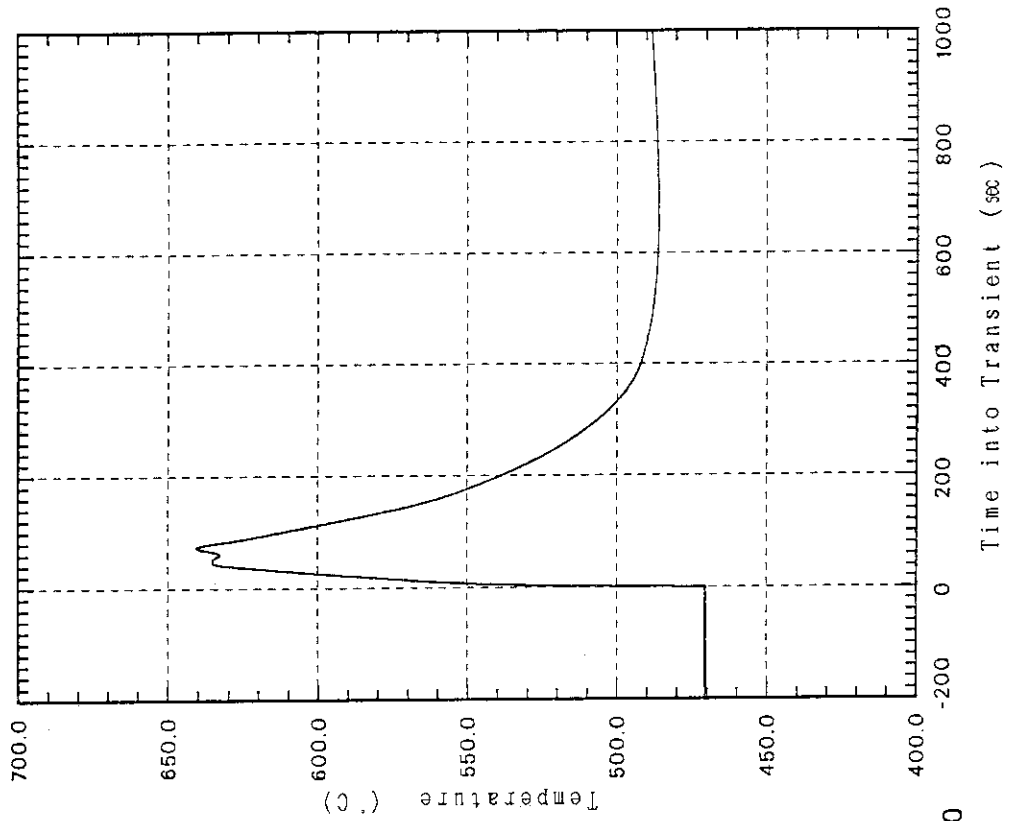


図 2.2.4 EBR-II でのULOH試験(SHRT45)における炉心出口温度
 (左図：直線-ANL解析結果 ○測定値、右図：改造「EXCURS」)

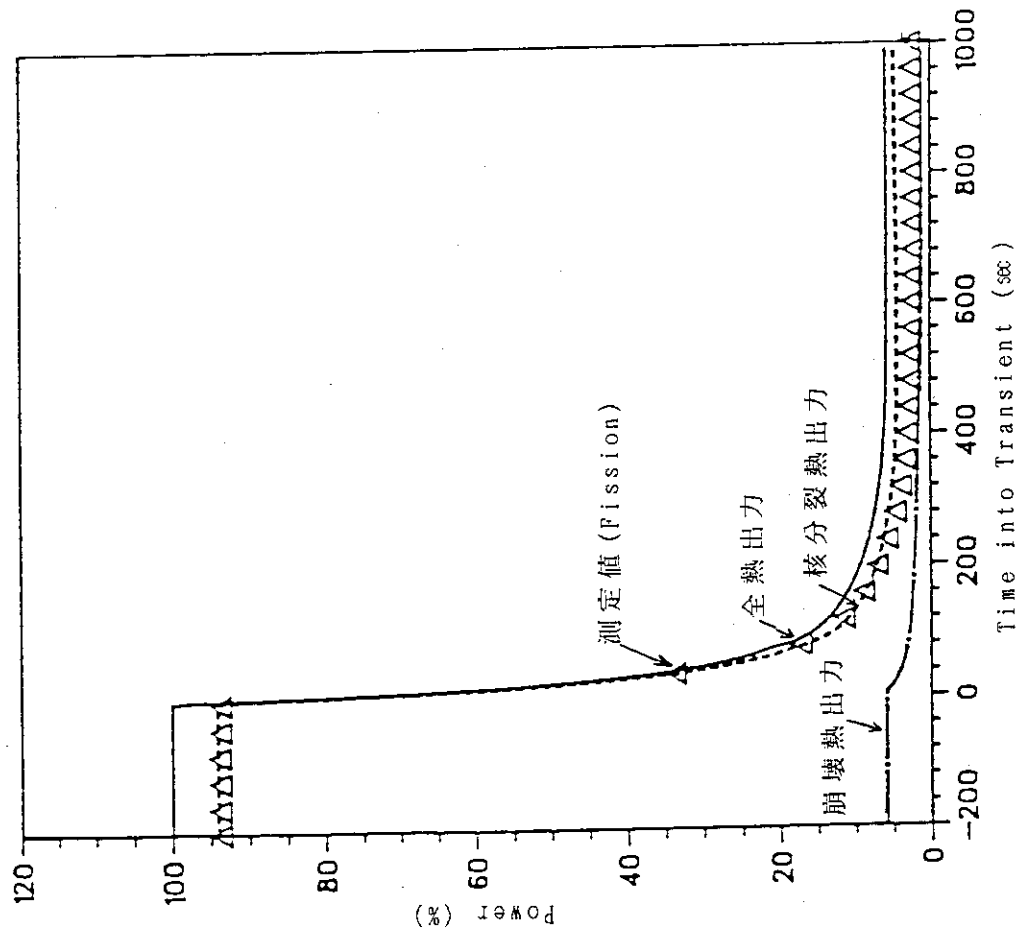
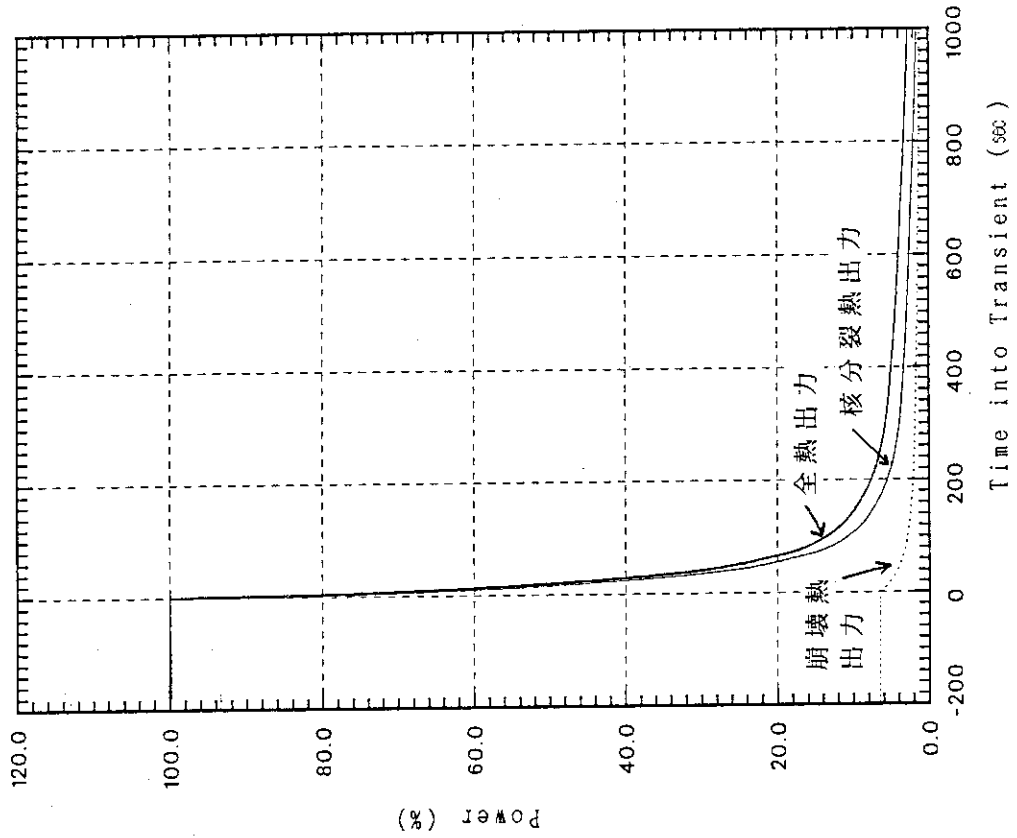
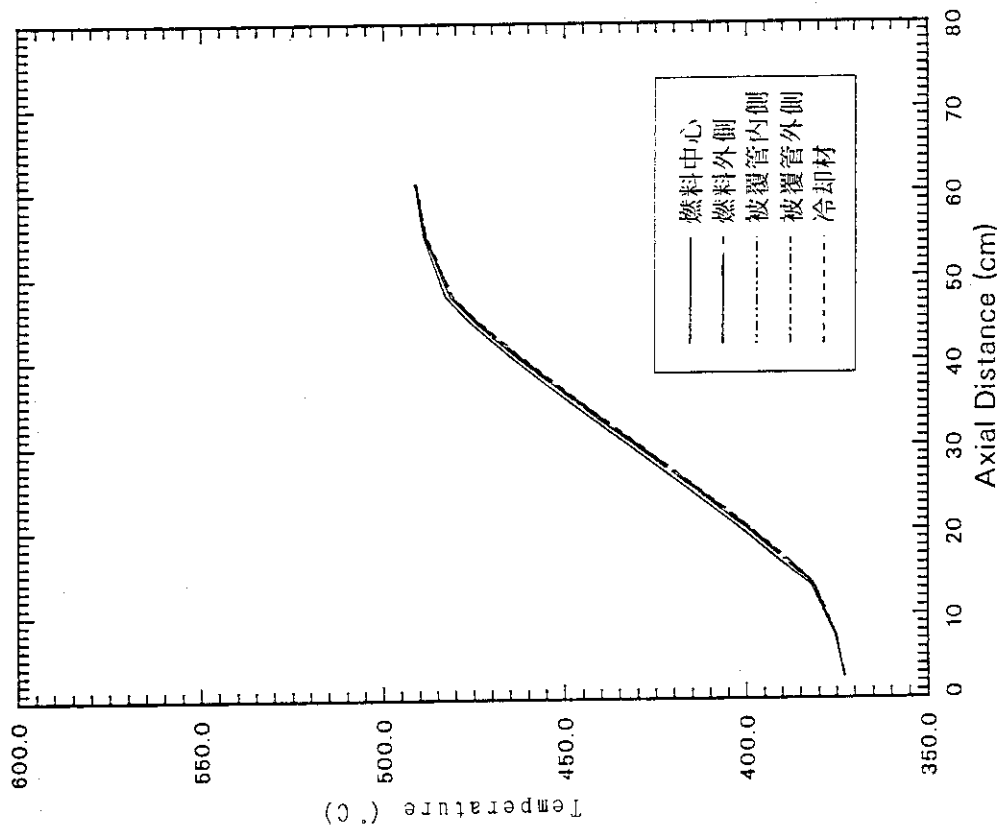
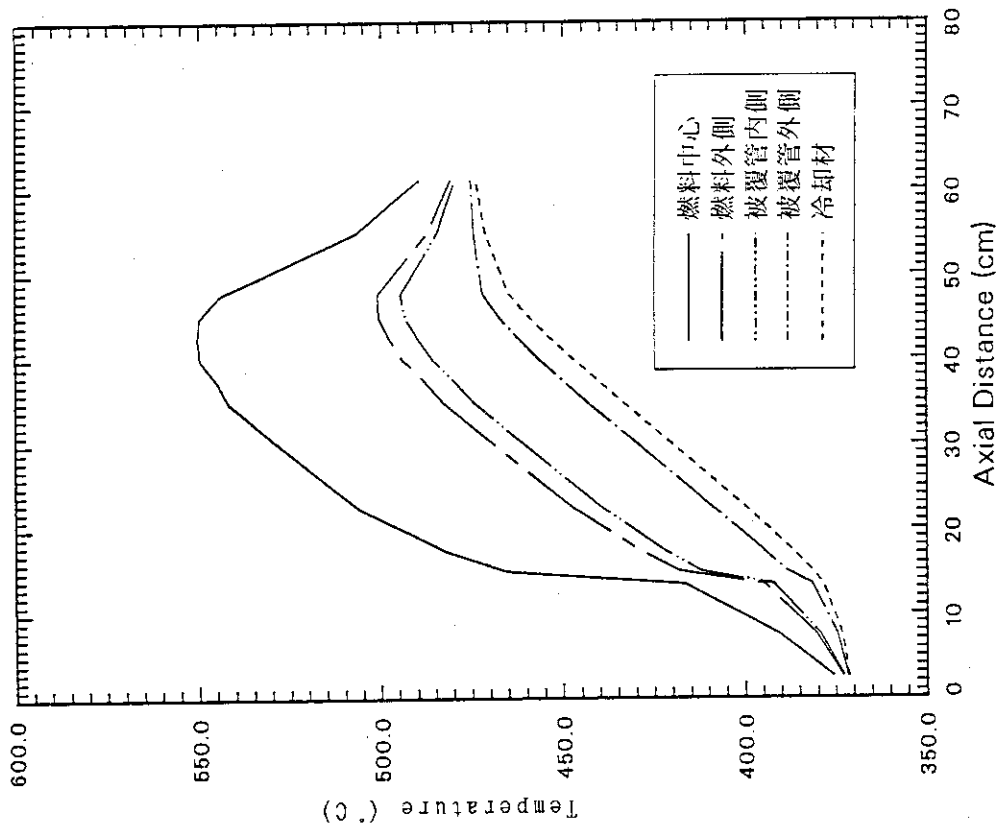


図 2.2.5 EBR-IIでのULOF試験(SHRT45)における炉心出力変化
 (左図：直線-ANL解析結果 ○-測定値、右図：改造「EXCURS」)



時刻 t=1000 秒での軸方向温度分布



時刻 t=0 秒での軸方向温度分布

図 2.2.6 EBR-II での ULOF 試験(SHRT45)における試験開始直後及び1000秒後の炉心軸方向温度分布

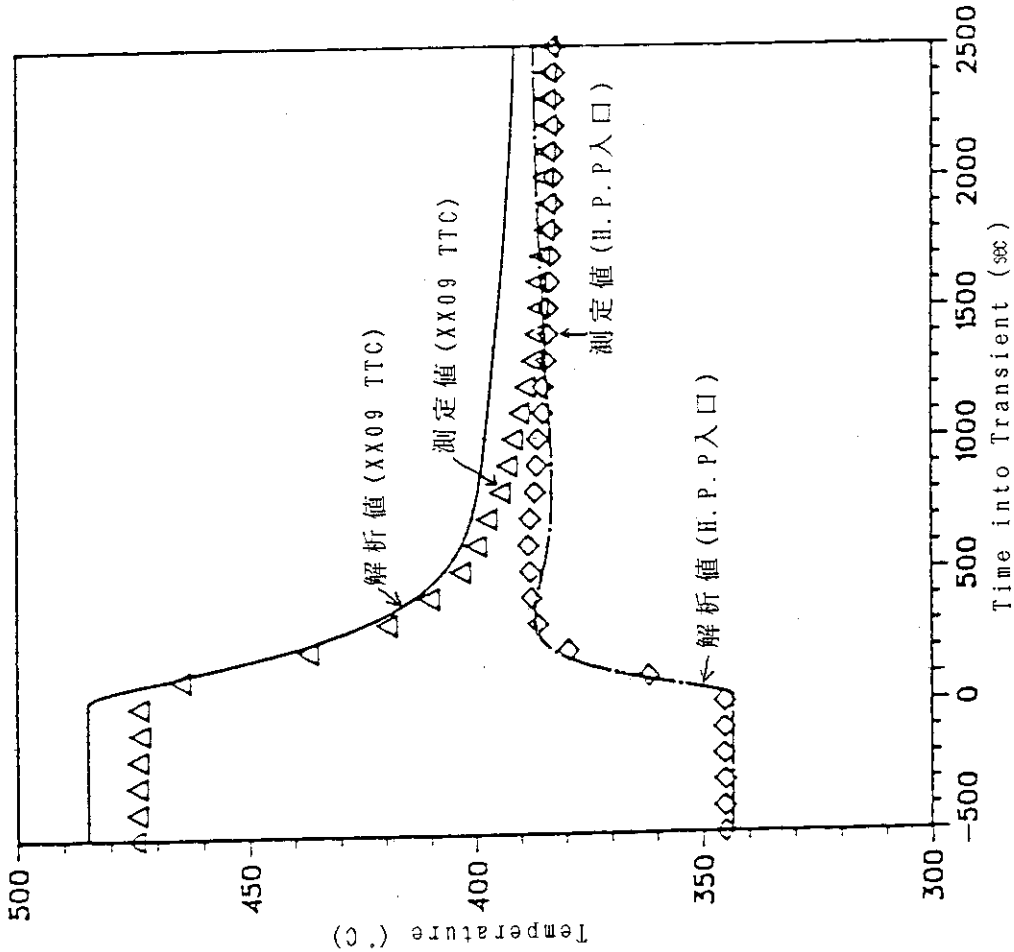
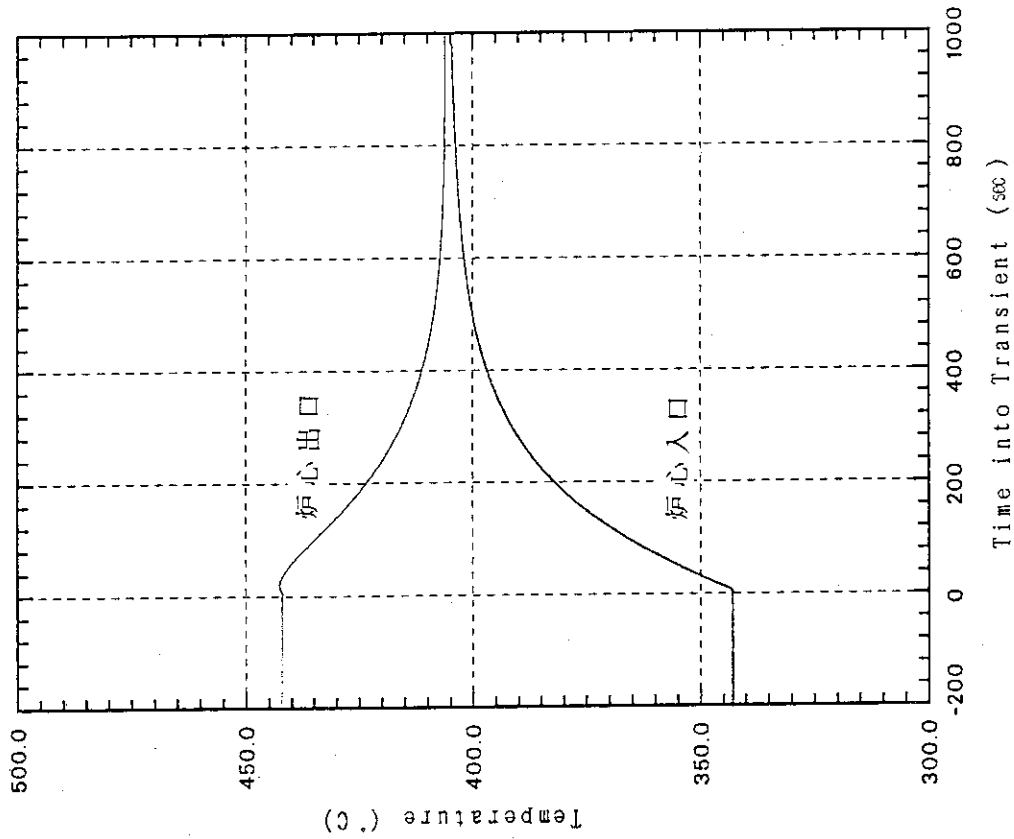


図 2.2.7 EBR-II での ULOHS 試験(B302)における炉心入口・出口温度変化
(左図：直線-ANL解析結果 △、◇-測定値、右図：改造「EXCURS」)

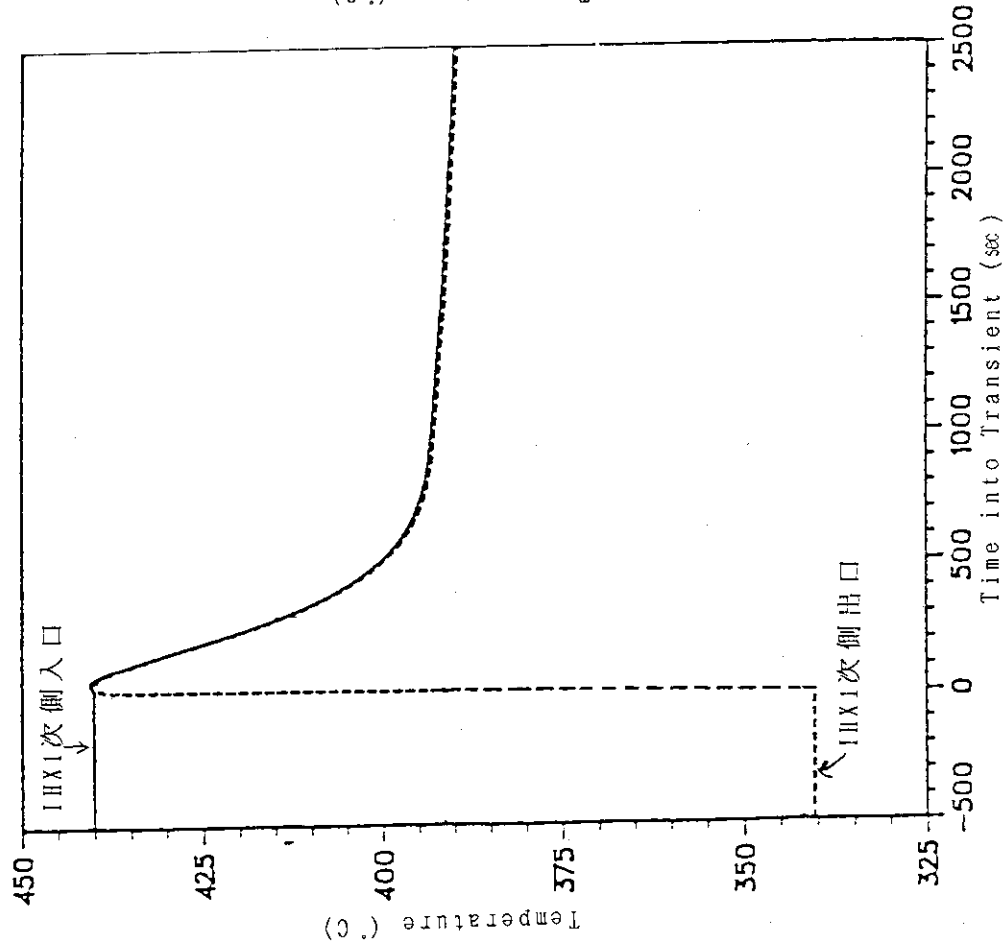
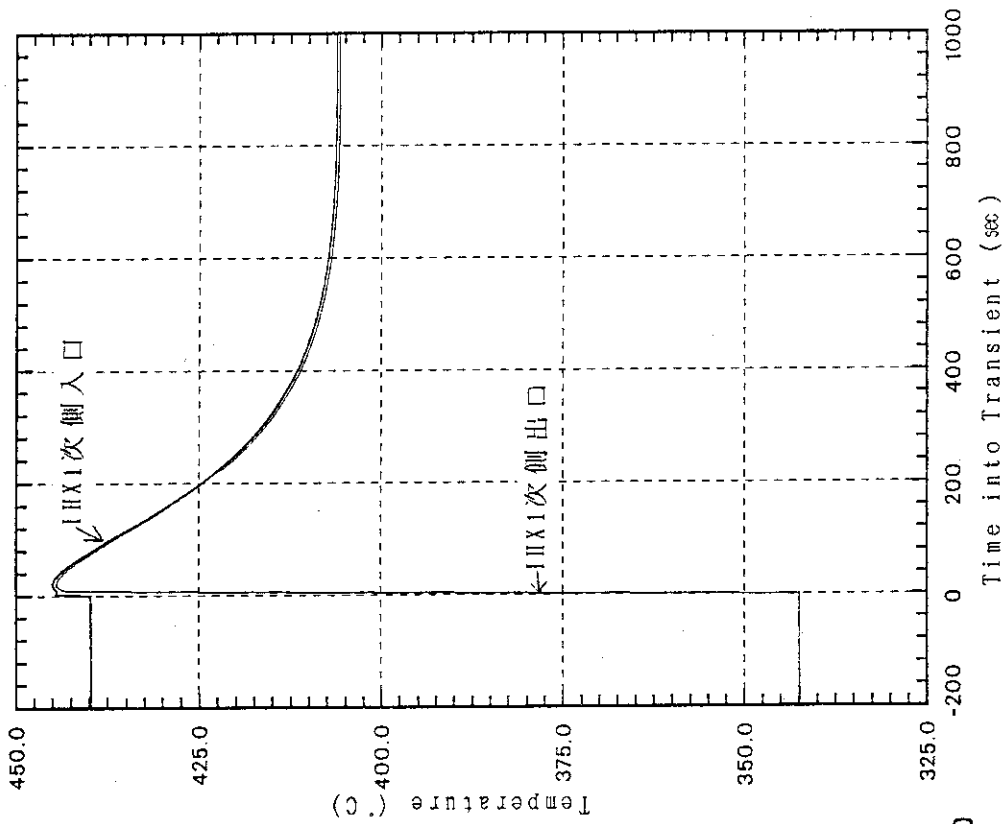


図 2.2.8 EBR-II での ULOHS 試験(B302)における IHX1 次系温度変化
 (左図：直線-ANL 解析結果、右図：改造「EXCURS」)

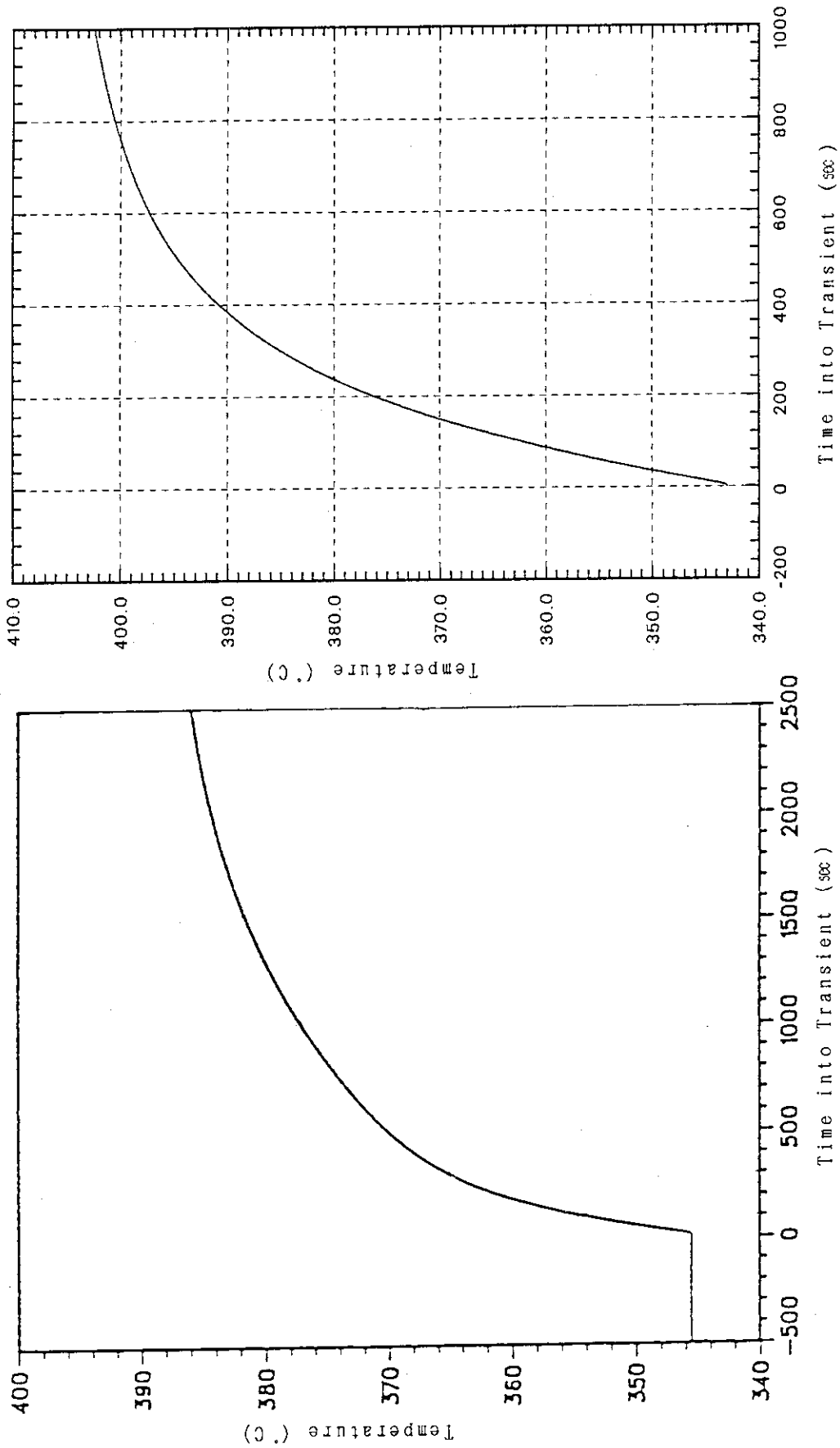


図 2.2.9 EBR-II での ULOHS 試験(B302)における主タンク (コールドプール) 平均温度変化
(左図: 直線-ANL 解析結果、右図: 改造「EXCURS」)

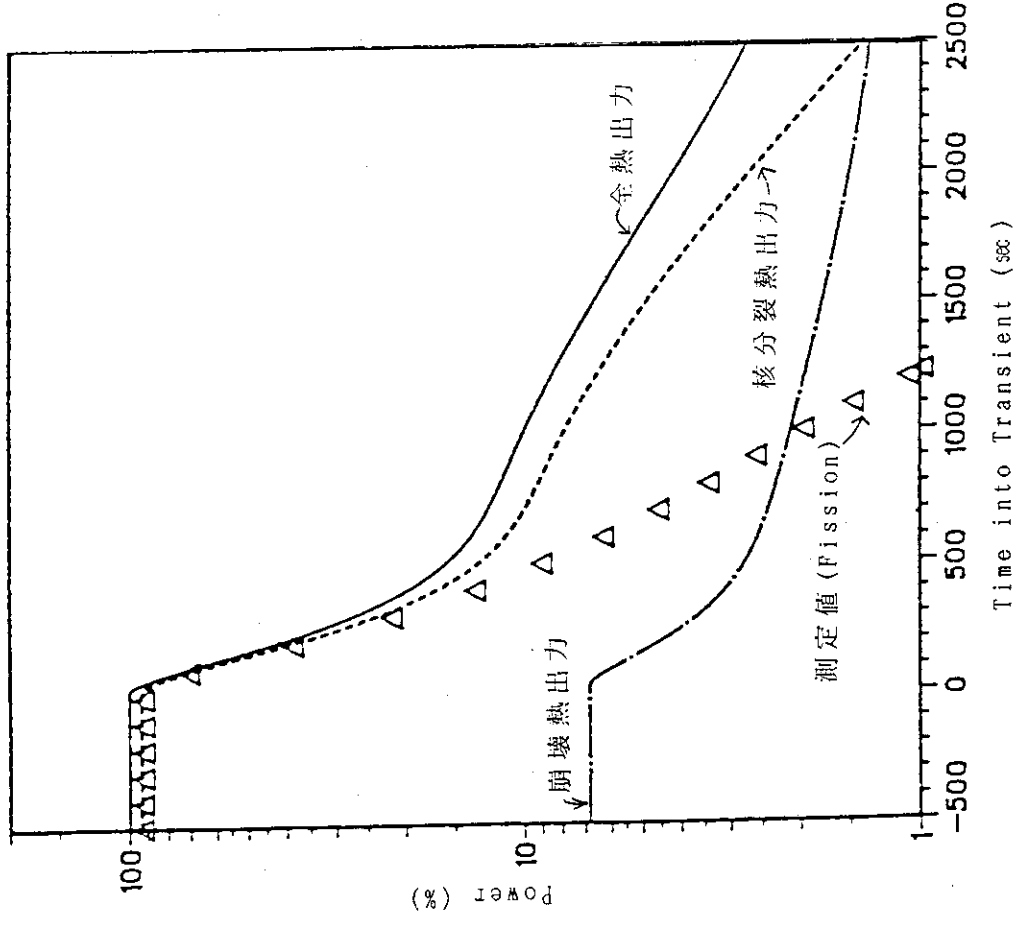
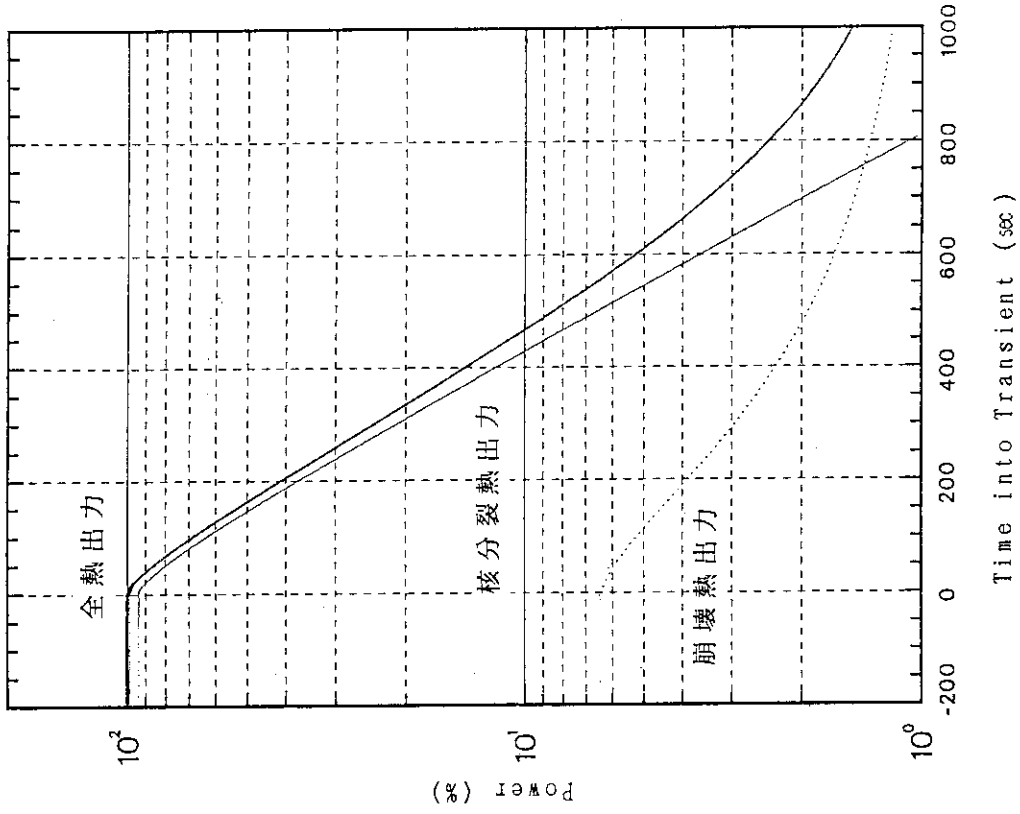


図 2.2.10 EBR-II での ULOHS 試験(B302)における炉心出力変化
(左図：直線-ANL解析結果、△-測定値、右図：改造「EXCURS」)

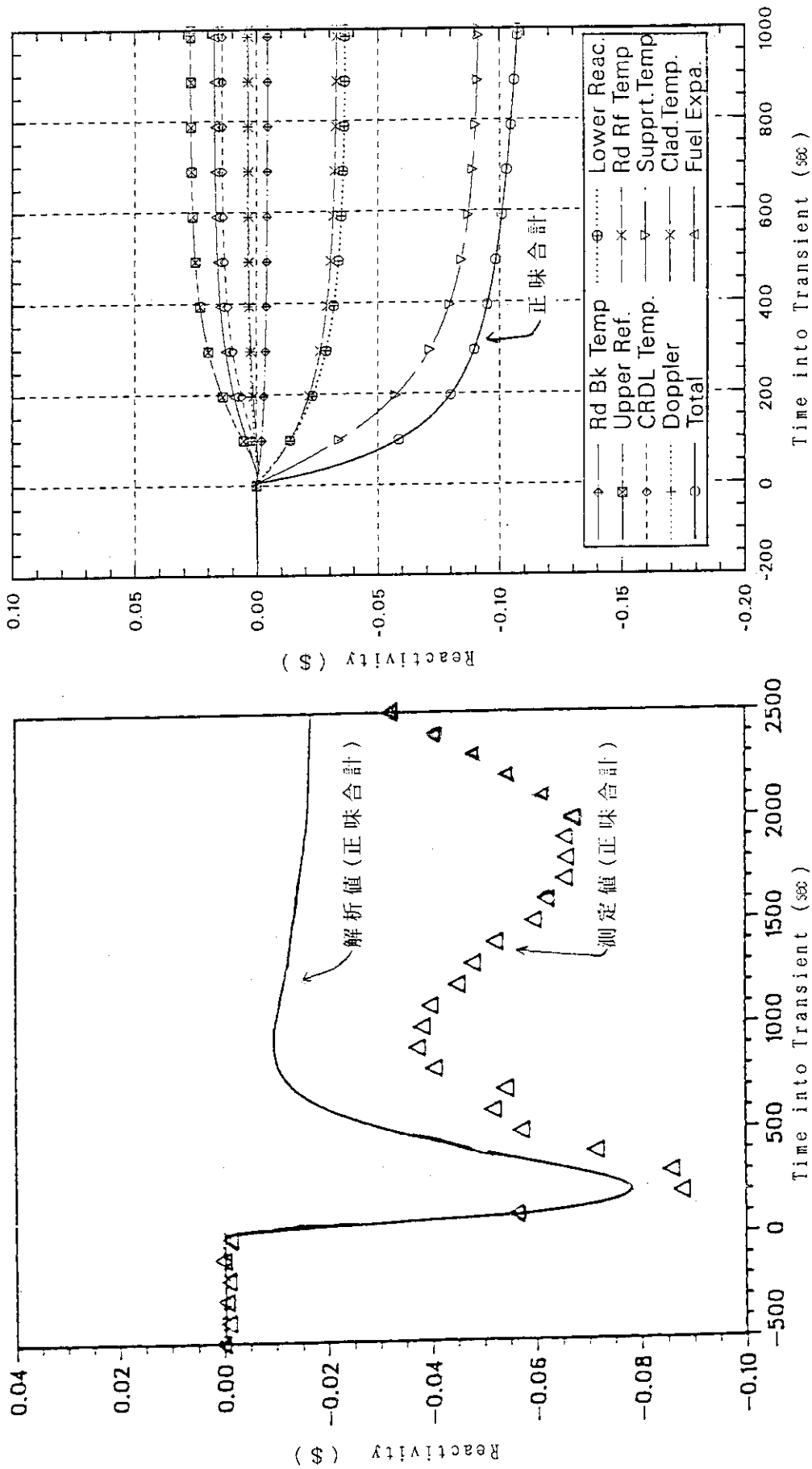


図 2.2.11 EBR-II でのULOHS試験(B302)における反応度変化
 (左図：直線-ANL解析結果、△-測定値、右図：改造「EXCURS」)

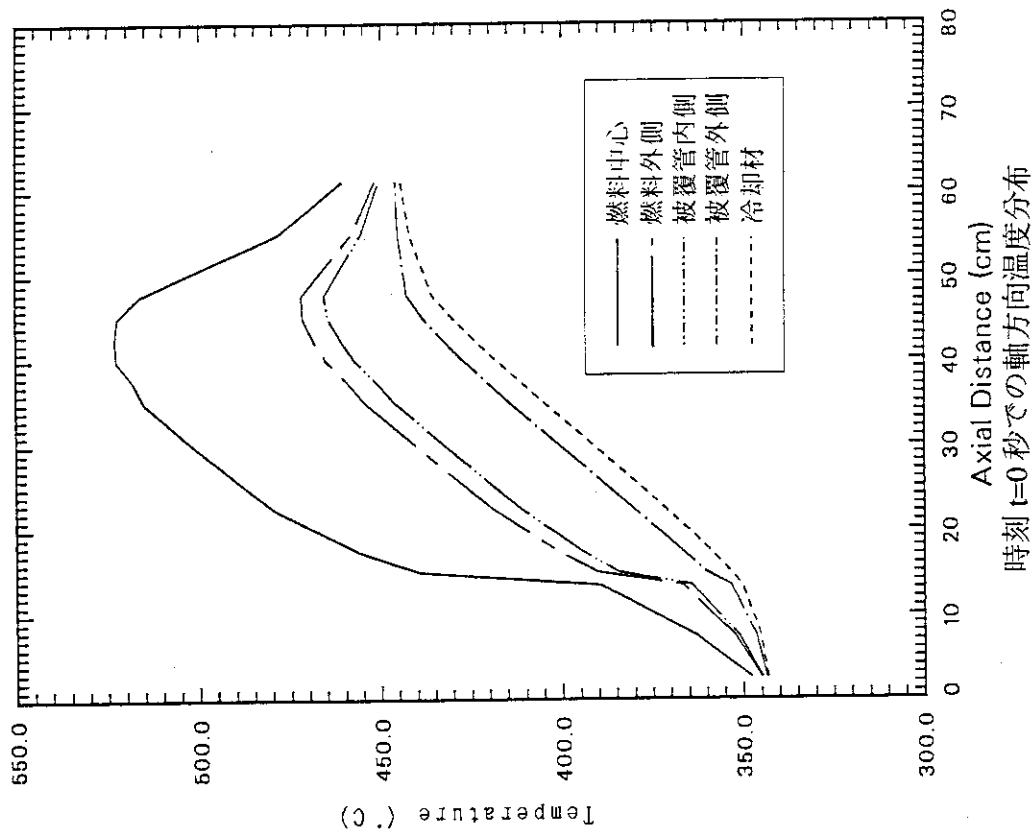
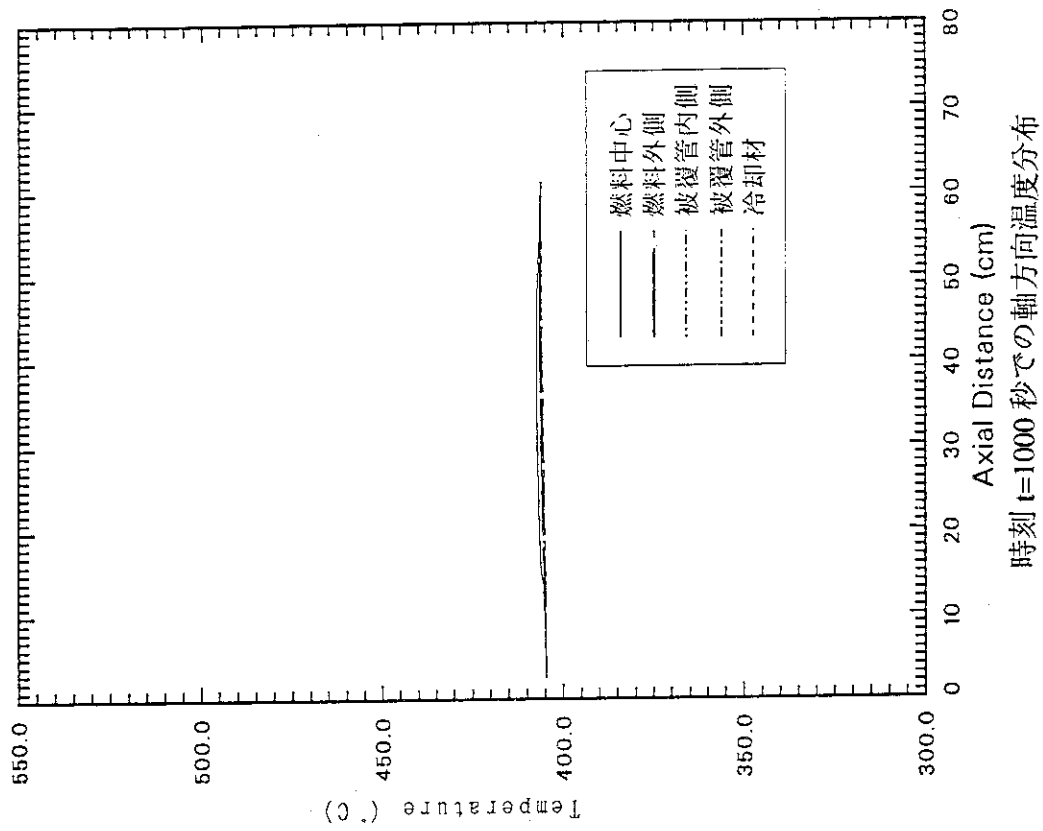


図 2.2.12 EBR-II での ULOHS 試験(B302)における試験開始直後及び1000秒後の炉心軸方向温度分布

2.2.2 1000MWe級金属燃料高速炉

電力中央研究所（以下、“電中研”と略す）で検討している1000MWe級金属燃料高速炉の過渡挙動解析を改造「EXCURS」を用いて行い、その解析結果を電中研で行った解析結果^{5)・9)}と比較した。

解析対象の1000MWe級金属燃料高速炉の特性と炉心構造を表2.2.5～表2.2.7に示す。

本解析では、平均チャンネルを設定するに当たり、炉心平均の燃料ピン発熱量を321W/cm(max.500W/cm)とし、燃料ピン出口温度が510°Cになるように冷却材の炉心平均流速を720cm/secと想定した。また、解析結果を電中研での結果と比較することを考慮して、従来の反応度効果算出の一部に対し、電中研での計算方法⁹⁾を参考に若干の修正を行った。この修正項目と内容については表2.2.8および図2.2.13～2.2.15に示す。

(1) 電中研での解析手法と改造「EXCURS」の相違

電中研では過渡解析コード「CERES」^{5)・9)}を用いて解析を行っている。「CERES」コードの炉容器内流動モデルを図2.2.13に、炉心フラワーリングによる反応度モデルを図2.2.14に、「制御棒-炉心相対変位」による反応度挿入モデルを図2.2.15にそれぞれ示す。電中研の解析モデルと改造「EXCURS」の解析モデル（図2.1参照）の相違点を次に述べる。

- ① 解析チャンネル：電中研では炉心を6領域（内側炉心-1,-2,-3、外側炉心、ブランケット、遮蔽体）に分け、個々に熱流動解析を行い、炉心半径方向熱伝達を考慮に入れて炉心全体の解析を行っている。これに対して、本解析では全領域を1つのチャンネルで代表している。
- ② プールの取り扱い：電中研ではホットプール及びコールドプールを3次元流動モデルで取り扱い、温度変化は自然対流と熱伝達から導出している。これに対して、本解析ではホットプール（またはコールドプール）へ流入した冷却材は流入直後にプール内一様に温度変化を与えると、仮定した。ここで、温度変化は流入量のみを考慮するとする。
- ③ 制御棒-炉心相対変位（CRDL）：電中研では制御棒の熱流動解析用に1チャンネル設け、制御棒の案内管内を冷却材が流れる構造を想定（図2.2.15参照）して制御棒駆動軸の温度変化を計算している。これに対して、本解析では炉心平均チャンネルとホットプールの両温度より制御棒駆動軸の温度を推定している。
- ④ 1次側流量：電中研では1次主循環ポンプ動特性から、自然循環流量と冷却材流量変化を求めている。これに対して、本解析では電中研の解析で得られた冷却材流量変化を解析条件としている。
- ⑤ IHX2次側流量：ULOF解析において、電中研ではt=0秒でポンプがトリップし、自然循環に移行するモデルを採用している。これに対して、本解析では1次側流量変化と同一とする。
- ⑥ PRACS：電中研では空気冷却器のダンパが全開になるまでの時間を40秒としているが、本解析ではPRACSは考慮できず、無いものとする。

(2) U L O F 解析

外部電源喪失事故を想定したU L O F 解析を行った。外部電源喪失のために1次・2次共に冷却材循環ポンプが停止したが、スクラムは失敗したと想定して、定常状態からポンプを止めて冷却材流量を自然循環量まで減少させた。この事故時の炉心過渡挙動特性を発生から500秒まで解析した。

解析条件

- ① 流量半減時間 : 10sec
- ② 流量変化の様子 : 図2.2.16 (電中研解析結果) に示す。改造「EXCURS」は解析条件として入力している。
- ③ 2次側の流量変化 : 1次側流量変化カーブと同一。

解析結果

- ① 初期軸方向温度分布と500秒後の軸方向温度分布 : 図2.2.17
- ② 出力の時間変化 : 図2.2.18
- ③ 反応度変化 : 図2.2.19
- ④ プラント内各部温度変化 : 図2.2.20

但し、図2.2.16～ 図2.2.20までは電中研の結果と合わせて、事象発生から400秒までの結果を示した。

電中研での解析結果との比較

解析結果の比較一覧表を表2.2.9に示す。各項目毎の概略は、以下のとおりである。

- ① 出力 : 下降の様子は両者で良く一致している。しかし、電中研の解析結果と比べて、本解析結果では収束値がやや小さい。
- ② 反応度 : 全体の傾向は両者で良く一致している。電中研の解析結果と比べて、正味の反応度は本解析が若干小さな負の反応度である。
 - (7) フラウリング : 電中研の解析結果と比べて、80秒程度までは本解析の方がやや大きな負の反応度であるが、それ以降では逆に若干小さな負の反応度である。
 - (イ) C R D L : 電中研の解析結果と比べて、本解析は全体に小さな負の反応度である。
 - (ウ) 冷却材 : 両者間ではほぼ一致している。
 - (エ) ドップラー : 電中研の解析結果に比べて、80秒程度までは本解析がやや大きな負の反応度である。それ以降では逆に小さな負の反応度である。
- ③ 炉心出口温度 : 両者は良く一致している。
- ④ I H X 1次側入口温度 : 両者は良く一致している。
- ⑤ I H X 1次側出口温度 : 両者間で傾向は良く一致しているが、電中研の解析結果に比べて、本解析は若干低い値を示す。

全体に本解析は電中研の解析結果と良い一致を示す。

(3) U T O P 解析

制御棒誤引き抜き事故を想定したU T O P解析を行った。制御棒誤引き抜きにより炉心にランプ状の正の反応度が挿入されると想定した時の炉心過渡特性解析を事象発生から500秒まで行った。なお、スクラムは失敗したと想定した。

解析条件

- ① 印加反応度：0秒から9秒までは3¢/secの速さで印加。 9秒以降は27¢印加。

解析結果

- ① 初期軸方向温度分布と500秒後の軸方向温度分布：図2.2.21
 ② 出力の時間変化：図2.2.22
 ③ 反応度変化：図2.2.23
 ④ 炉心出入口温度変化：図2.2.24

但し、図2.2.22～図2.2.24までは電中研の結果と合わせるために、事象発生から400秒までの結果を示した。

電中研での解析結果との比較

全体に本解析は電中研の解析結果と良い一致を示す。解析結果の比較一覧表を表2.2.10に示す。各項目毎の概略は、以下のとおりである。

- ① 出力：変化の様子は概ね一致している。しかし、電中研の解析結果と比べて本解析は、上昇速度および下降速度がやや大きい。これは、正味の反応度の変化が電中研に比べて大きいためだと思われる。
- ② 反応度：傾向は、全体に両者で良く一致している。正味の反応度は、約80秒までは電中研の解析結果と比べて、本解析での正の反応度は大きく、80秒以降では負の反応度は小さい。
- (ア) フラワーリング：時定数が若干異なる。電中研の解析結果と比べて、本解析の方がやや大きな負の反応度である。
- (イ) C R D L：電中研の解析結果と比べて、本解析は小さな負の反応度を与える。
- (ウ) 冷却材：両者は良く一致している。
- (エ) ドップラー：電中研の解析結果と比べて、本解析は80秒程度までやや大きい、それ以降では逆に小さい。
- (オ) 炉心下部支持板：電中研の解析結果と比べて、本解析はやや大きい。
- ③ 炉心出口温度：電中研の解析結果と比べて、本解析は160秒まではやや高いが、それ以後は若干低めの値である。
- ④ 炉心入口温度：電中研の解析結果と比べて、本解析はやや温度上昇が速く、早めに一定なる。

炉心入口温度上昇が電中研の結果に比べて速い理由として、コールドプールの温度評価を行うためのモデル化が3次元流動モデルでないために十分でないと考えられる。また、炉心入口温度が高めに評価されたために、炉心支持板の温度が高くなり、その結果、炉心支持板径方向膨張による反応度を大きく見積っていると思われる。

表 2.2.5 解析に用いた1000MWe級金属燃料高速炉の温度係数

出口/入口温度	510/355°C
冷却材温度	438°C (温度係数用
燃料温度	541 評価温度)
被覆管温度	454
Naボンド温度	466
項目	温度係数 ($10^{-6} \Delta k/k \cdot ^\circ C$)
ドップラー	$-4.90 \times 10^{-3} Tdk/dT$
燃料軸方向膨張	-2.95 (被覆管の伸び)
炉心のNa密度	+8.03
制御棒延長棒の膨張	-2.6 (-0.0345dk/k/m)
炉心支持板の膨張	-10.88
被覆管膨張(+Na排出)	+1.62
Naボンド	0.0(ギャップが無い場合)

表 2.2.6 解析に用いた1000MWe級金属燃料高速炉のヒートバランス

① 炉心 (平均チャンネル)			
入口温度/出口温度 (°C)		355/510	
流量 (kg/sec)		13178(Total)	
② プール			
		ホットプール	コールドプール
容積 (m ³)		845	938
温度 (°C)		510	355
流量 (kg/sec)		13178	13178
③ 中間熱交換器 (IHX)			
一次側入口温度/出口温度 (°C)		510/355	
流量 (kg/sec)		13178	
流速 (m/sec)		1.642 (伝熱部)	
二次側入口温度/出口温度 (°C)		310/475	
流量 (kg/sec)		12310	
流速 (m/sec)		1.412 (伝熱部)	
④ 炉心入口パイプ			
長さ/直径 (m)		12/1.540	
流速 (m/sec)		8.162	
流量 (kg/sec)		13178	

表 2.2.7 解析に用いた1000MWe級金属燃料高速炉の炉心構成と特性

原子炉形式	U-Pu-Zr金属燃料Na冷却タンク型高速中性子炉	
電気出力/熱出力	100万kWe/260万kWt	
炉心形式	均質炉	
原子炉構造	炉容器支持：上部支持方式	炉心支持：側部支持方式
1次主循環ポンプ	機械式ポンプ4基（2段片吸入型/自由液面遠心式）	
中間熱交換器	縦置直管型8基（伝熱管内1次ナトリウム）	
2次冷却系	4ループ 安全上の位置付け：非安全系	
蒸気発生器	一体貫流ヘリカルコイル型	1基/ループ
崩壊熱除去系	非常用：1次系共用直接炉心冷却系（PRACS） 自然循環式、4ループ	
燃料富化度 Pu/(U+Pu) (内側/外側), (wt-%)	11.2/15.7	
最大線出力	500 W/cm	
最大高速中性子照射量	3.91×10^{23} (n/cm ²)、但し En>0.1MeV	
炉心取出平均燃料度	85000 MWd/t	
集合体本数	174体(内側炉心), 114体(外側炉心), 138体(ブランケット) 78体(SUS反射体), 270体(B ₄ C遮蔽体)	
制御棒本数	25本(主;18本/後備7本)	
炉心圧損	4.5 kg/cm ²	
炉心燃料使用期間	3年	
運転サイクル長さ	365日	
	<u>炉心燃料</u>	<u>半径方向ブランケット</u>
燃料スラグ直径	6.1 mm	12.4mm
燃料密度	75%TD	85%TD
燃料被覆管外径	7.86mm	10.7mm
燃料被覆管肉厚	0.43mm	0.4mm
燃料要素配列ピッチ	9.28mm	13.53mm
燃料要素/集合体	271本	127本
ラッパ管内対面距離	155.3 mm	同左
ラッパ管肉厚	4 mm	同左
集合体配列ピッチ	167.3 mm	同左
集合体全長	4400 mm	同左
被覆管、ラッパ管材質	改良フェライト鋼	同左
実効遅発中性子割合(平衡サイクル末期)	0.00378	
β_1	5.09×10^{-5}	β_2 7.98×10^{-4}
β_3	6.95×10^{-4}	β_4 1.40×10^{-3}
β_5	6.45×10^{-4}	β_6 1.91×10^{-4}
即発中性子寿命	0.33 μ sec	

表 2.2.8 修正された改造「EXCURS」反応度計算式一覧

I. 燃料軸方向膨張	<p>金属燃料炉心では被覆管に引っ張られて燃料ピンが膨張すると仮定して、以下のように変更した。</p> <p>旧；$\rho \cdot$ (燃料スラグの平均温度変化)</p> <p>新；$\rho \cdot$ (被覆管の平均温度変化)</p>
II. 炉心下部支持板膨張	<p>炉心入口温度から遅れ時間(τ)=110secの1次遅れで支持板は膨張すると仮定した。</p> $T_m(t + \Delta t) = T_f(t + \Delta t) - \{T_f(t + \Delta t) - T_m(t)\} \cdot \exp(-t/\tau)$ <p>$T_m(t)$; 時刻tの炉心支持板温度 $T_f(t)$; 時刻tの入口温度</p>
III. 炉心フラワ-リング	<p>炉心下部支持板の温度膨張効果を補正した値に置き換えている。(図2.2.14参照)</p> <p>①: (炉心中心部の伸び) \geq (炉心下部の伸び) $\rightarrow \rho \cdot \{(\text{炉心中心部の伸び}) - (\text{炉心下部の伸び})\}$</p> <p>②: (炉心中心部の伸び) $<$ (炉心下部の伸び) $\rightarrow 0.0$</p> <p>①の場合, 炉心中心部の膨張係数と炉心下部の膨張係数を同じとすると、①は</p> $\rho \cdot \{(\text{炉心中心部の温度変化}) - (\text{炉心下部の温度変化})\}$ $= (\text{炉心中心部の反応度変化}) - (\text{炉心下部の反応度変化})$
V. 制御棒-炉心相対変位	<p>電中研のモデルは</p> $\rho \cdot (\text{制御棒駆動軸回りの温度変化})$ $+ \rho \cdot (\text{制御棒吸収体の軸方向膨張})$ $+ \rho \cdot (\text{燃料スラグ軸方向膨張})$ $+ , , ,$ <p>である。(図2.2.15参照)</p> <p>EXCURSでは次のモデル化を採用した。</p> <p>(燃料スラグ回りの温度変化) ; 1.0m (炉心出口温度変化) ; 0.5m (ホット・プールの温度変化) ; 3.1m</p> <p>なおホット・プールの温度変化だけで計算した場合だと、電中研での解析に比べ、CRDLでの温度変化が小さくなり、CRDLの負の反応度が数%小さくなる。</p>

表 2.2.9 1000MWe級金属燃料高速炉のULOF解析結果

項目		0-sec	20-sec	40-sec	80-sec	160-sec	200-sec	その他
出力	電	100%	65%	41%	21%	10%	9%	6.1%, 360sec
	E	100%	62%	41%	21%	10%	8%	5.6%, 360sec
反応度 (ϕ)	電		-18	-27	-31	-22	-15	80secで最大
	E		-18.1	-24.5	-28.5	-16.2	-10.6	80secで最大
フューリン ク (ϕ)	電		-23	-32	-38	-32	-25	
	E		-24.7	-34.3	-40.9	-29.9	-24.0	
CRDL (ϕ)	電		-6	-12	-14	-11	-9	
	E		-2.7	-4.2	-5.6	-5.4	-5.1	
冷却材 (ϕ)	電		18	23	27	18	15	
	E		16.0	22.2	26.6	19.6	15.9	
ドップラ (ϕ)	電		-5	-5	-4	3	6	
	E		-5.3	-6.4	-6.5	0.5	3.5	
炉心出 口温度	電	510 ¹⁾	650	700	740	710	660	605
	E	510	645	700	738	680	646	596
IHX入 口温度	電	510	515	525	545	560	565	575
	E	510	523	537	554	570	574	579
IHX出 口温度	電	355	345	345	370	420	430	450
	E	355	342	351	386	407	411	418

注) 電; 電中研の解析結果。グラフからの読み取り

E; 改造「EXCURS」解析結果。

1); 外側炉心出口温度で代用。

その他の項で時間指定の無いものは400sec時の値。

表 2.2.10 1000MWe級金属燃料高速炉のU T O P解析結果

項目		0-sec	20-sec	40-sec	80-sec	160-sec	200-sec	その他
出力	電	100%	146%	150%	152%	140%	132%	142%, 9sec
	E	100%	145%	149%	145%	124%	114%	135%, 9sec
反応度 (ϕ)	電		6	3	---	-1.0	-1.5	15 ϕ , 9sec ¹⁾
	E		6.6	3.2	0.1	-2.0	-2.0	13 ϕ , 9sec ¹⁾
炉心下 部(ϕ)	電		---	---	-1.0	-3.5	-7	-21.5
	E		---	-0.3	-1.3	-6.5	-10.0	-21.9
フワ-リ ク(ϕ)	電		-11	-12	-14	-13	-12	
	E		-13.5	-15.3	-17.1	-16.7	-14.6	
CRDL (ϕ)	電		-6	-7	-8	-10	-11	
	E		-1.9	-3.0	-4.5	-6.0	-6.3	
冷却材 (ϕ)	電		8	9	11	16	18	
	E		8.9	10.4	12.4	16.5	17.7	
ドップラ (ϕ)	電		-11	-12	-14	-16	-16	
	E		-12.6	-14.1	-14.8	-14.4	-13.9	
炉心出 口温度	電	510 ²⁾	575	580	590	605	610	610
	E	510	584	594	601	606	606	600
IHX入 口温度	電							
	E	510	525	546	574	599	603	601
IHX出 口温度	電							
	E	355	370	372	402	434	440	441
炉心入 口温度	電	355	355	355	360	395	410	450
	E	355	358	361	374	410	423	442

注) 電; 電中研の解析結果。グラフからの読み取り。

E; 改造「EXCURS」解析結果。

1); どちらもグラフ読み取り。最大点

2); 外側炉心出口温度で代用。

その他の項で時間指定の無いものは400sec時の値。

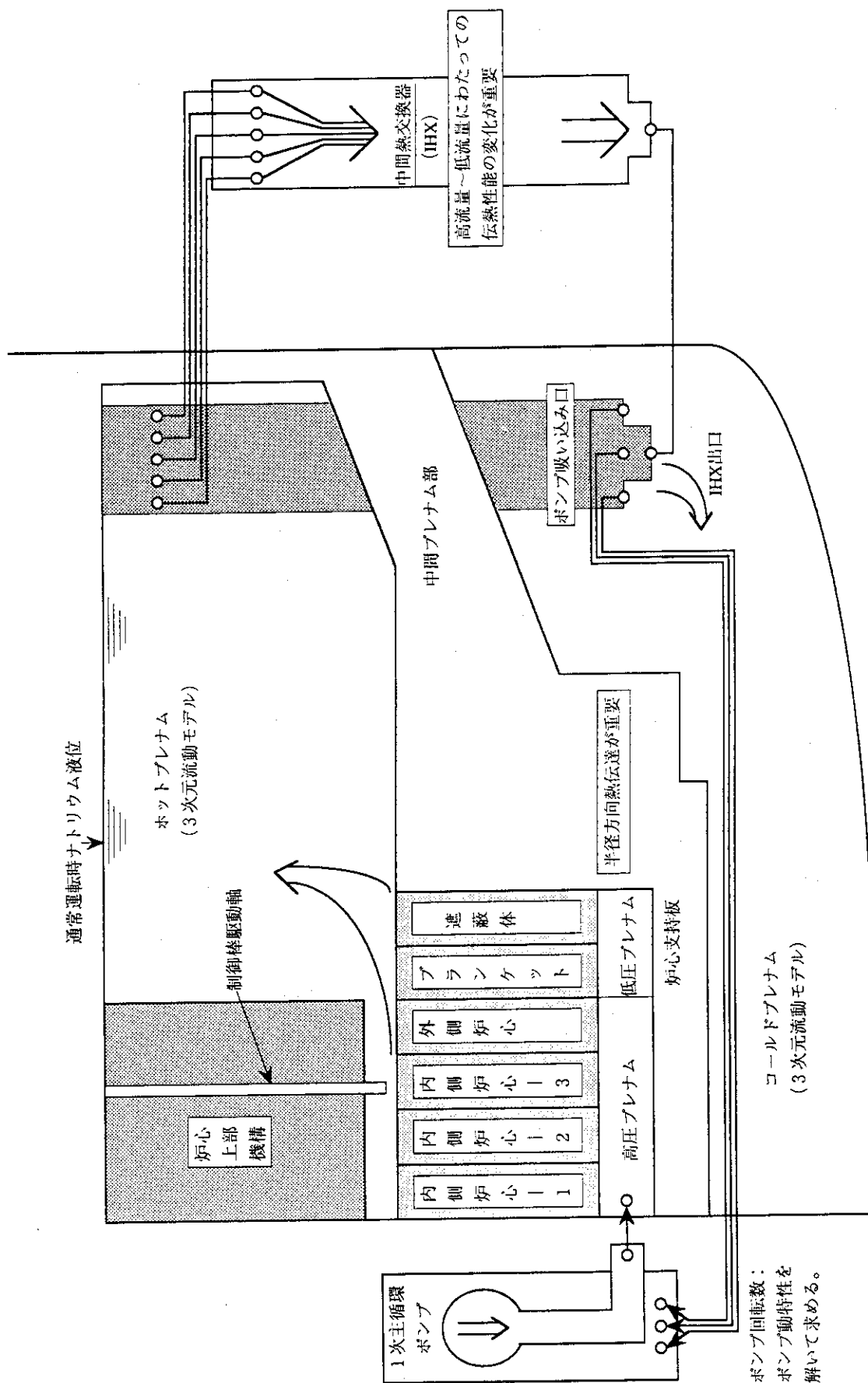
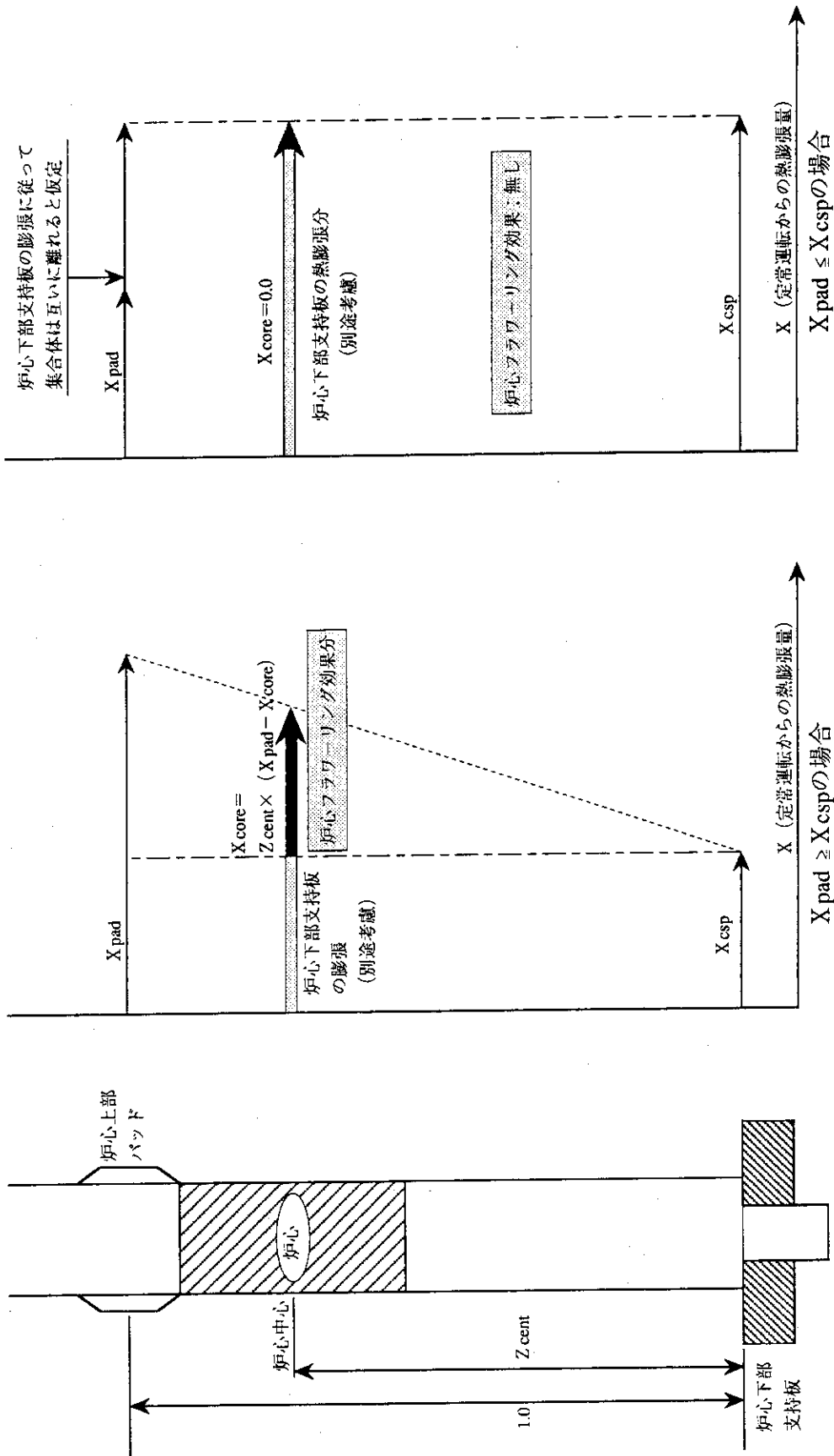


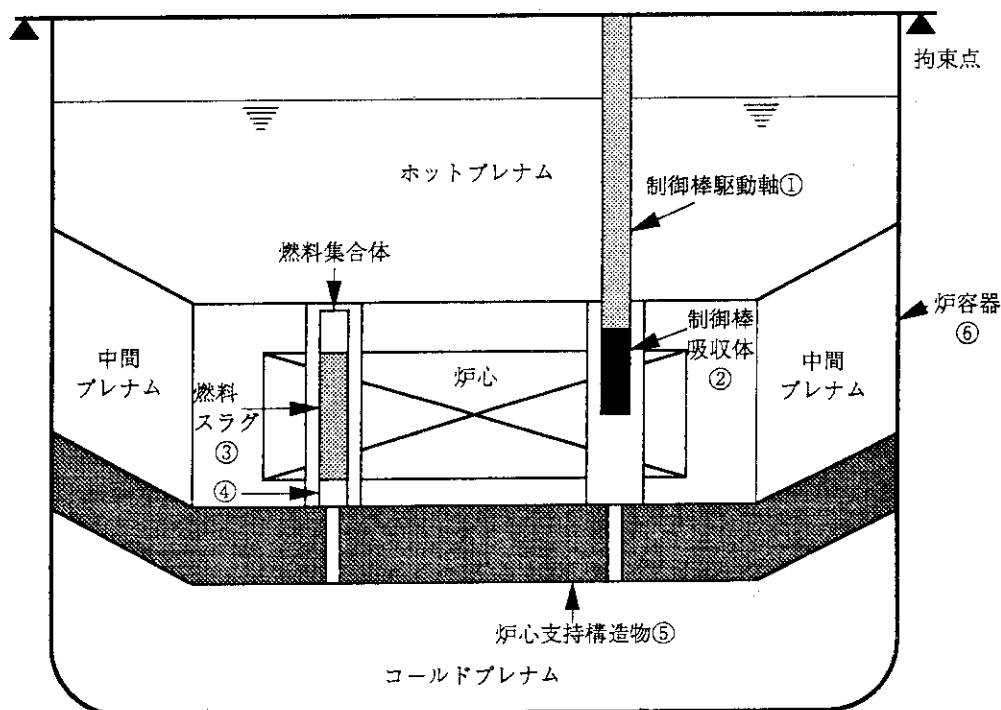
図 2.2.13 電力中央研究所版A TWS解析用主容器内流動モデル (CERESコード)

炉心フラワーリング反応度 = 径方向膨張係数 $\times X_{core}$



注) $X_{pad} =$ (炉心上部パッドでの炉心等価直径) \times (炉心上部パッド部線膨張率) \times (パッド部温度変化)
 $X_{csp} =$ (炉心下部支持板での炉心等価直径) \times (炉心下部支持板の線膨張率) \times (炉心下部支持板温度変化)

図 2.2.14 炉心フラワーリングによる反応度挿入モデルの概念



- | 記号 | 説明 |
|----|--------------------------|
| ① | : 制御棒駆動軸の軸方向熱膨張 |
| ② | : 制御棒吸収体の軸方向熱膨張 |
| ③ | : 燃料スラグの軸方向熱膨張 |
| ④ | : 燃料要素下部領域の軸方向熱膨張 |
| ⑤ | : 炉心支持構造物の熱膨張の軸方向成分 |
| ⑥ | : 炉容器 (ホットプレナム部) の軸方向熱膨張 |

(正味の制御棒-炉心相対変位置) = ① + ② + ③ + ④ - ⑤ - ⑥

記号	熱膨張に寄与する長さ(m)	代表温度	伝熱時定数(秒)
①	3.09	制御棒駆動軸回りの冷却材温度	約10.
②	1.00	制御棒温度	——
③	(④に含めて扱う)	——	——
④	1.95	被覆管温度	——
⑤	(⑥に含めて扱う)	——	——
⑥	6.40	ホットプレナム部の冷却材温度	約43000.

図 2.2.15 「制御棒-炉心相対変位」による反応度挿入モデルの概念 (今回の解析で電力中央研究所が用いたモデル)

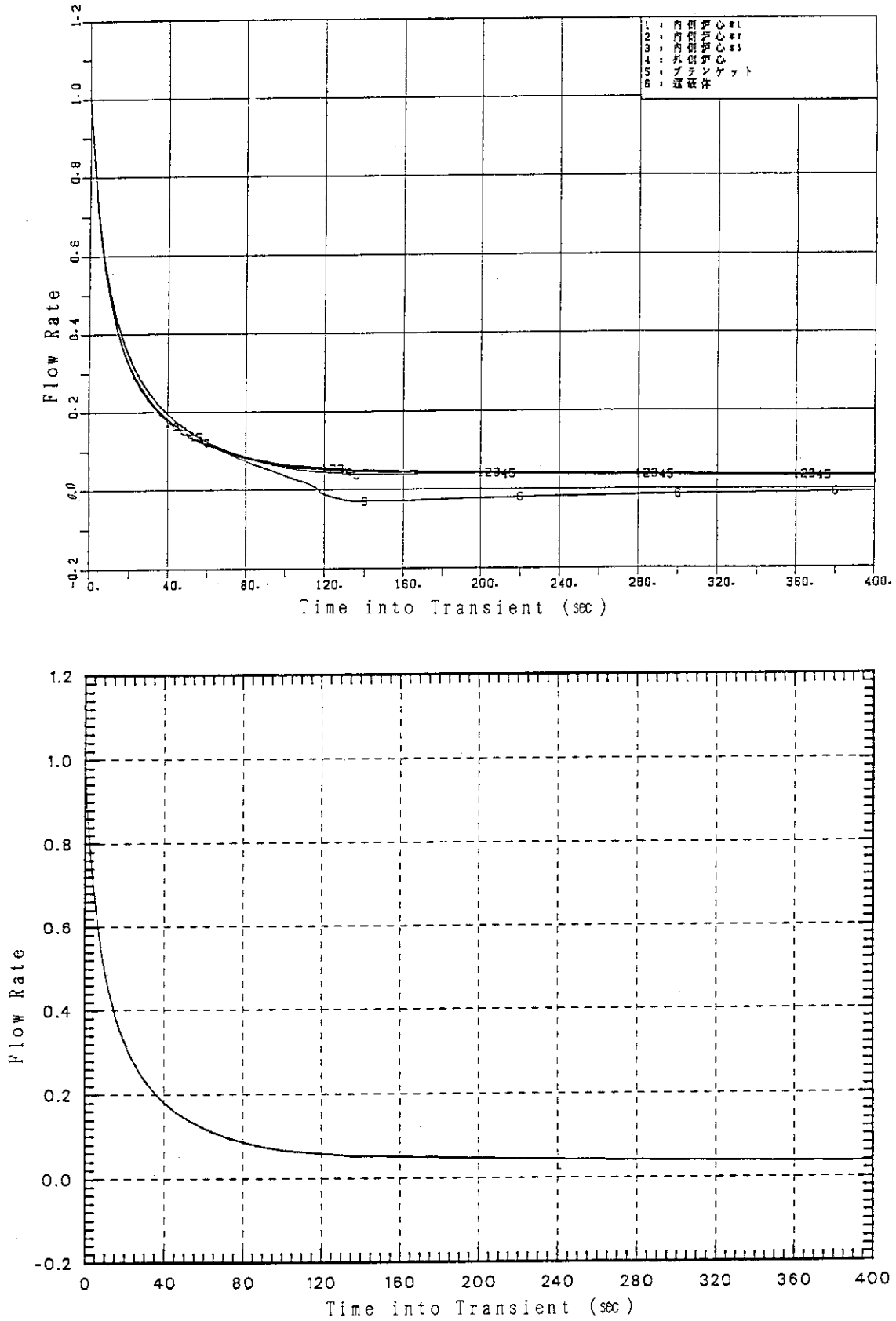
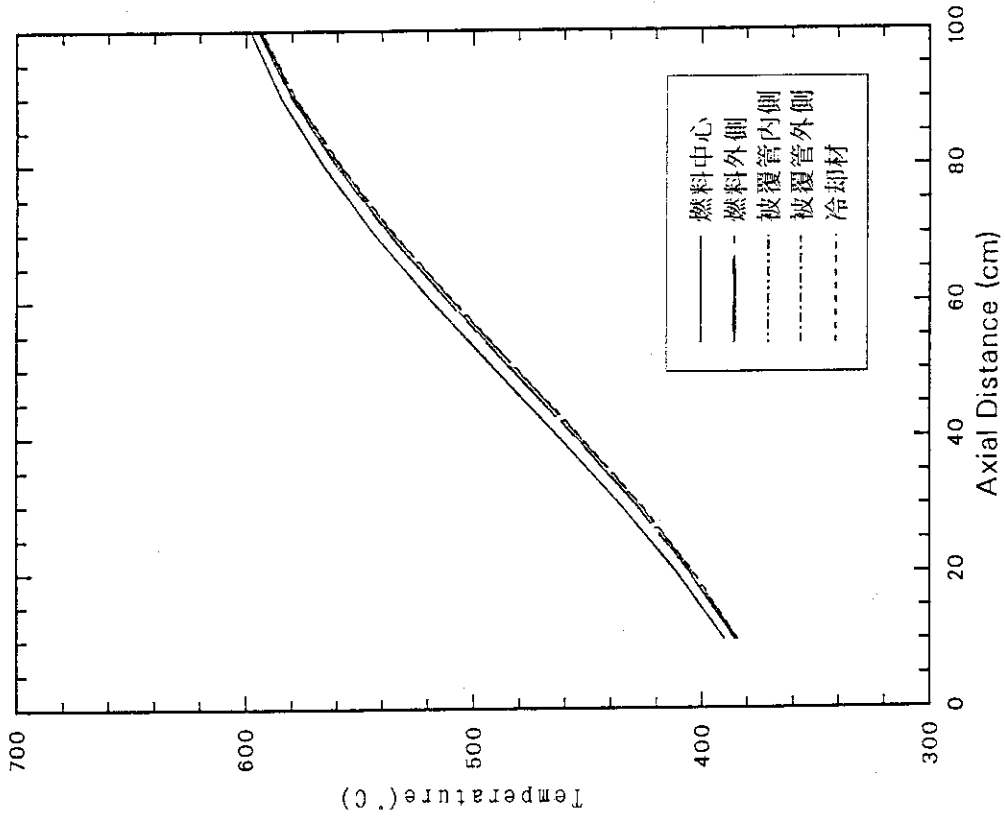
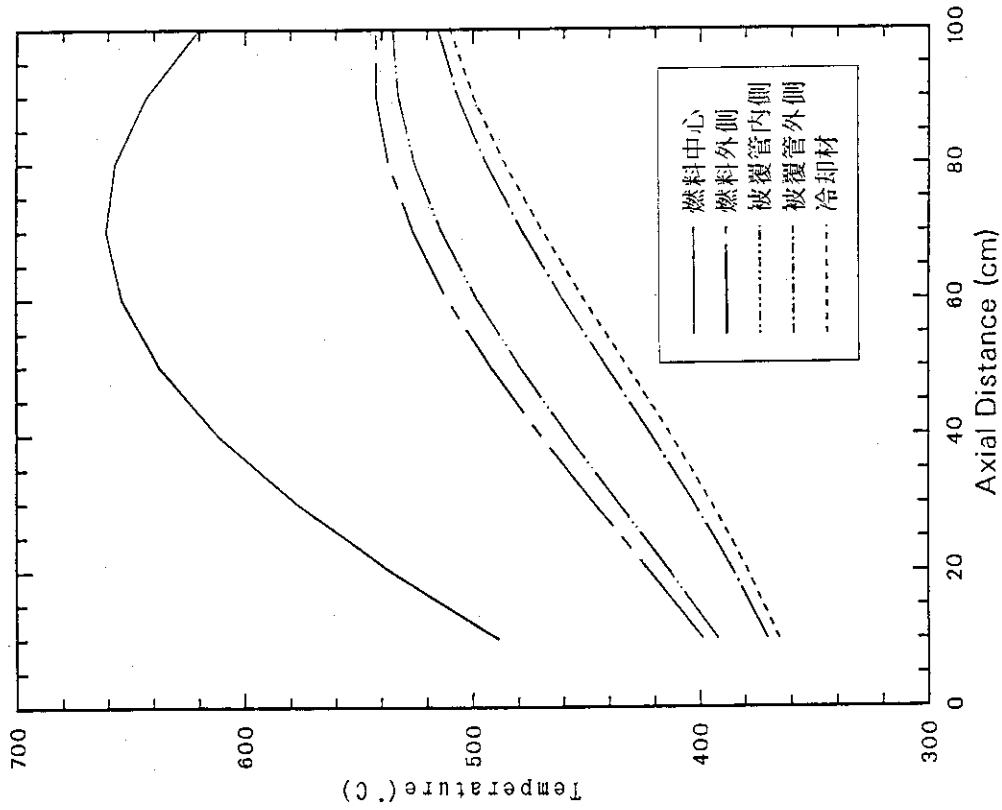


図 2.2.16 1000MWe 金属燃料高速炉でのULOF解析における流量変化
 (上図：電力中央研究所、下図：改造「EXCURS」入力)



時刻 t=500 秒時の軸方向温度分布



時刻 t=0 秒時の軸方向温度分布

図 2.2.17 1000MWe 金属燃料高速炉のULOF解析における試験開始直後及び500秒後の炉心軸方向温度分布
(改造「EXCURS」で解析)

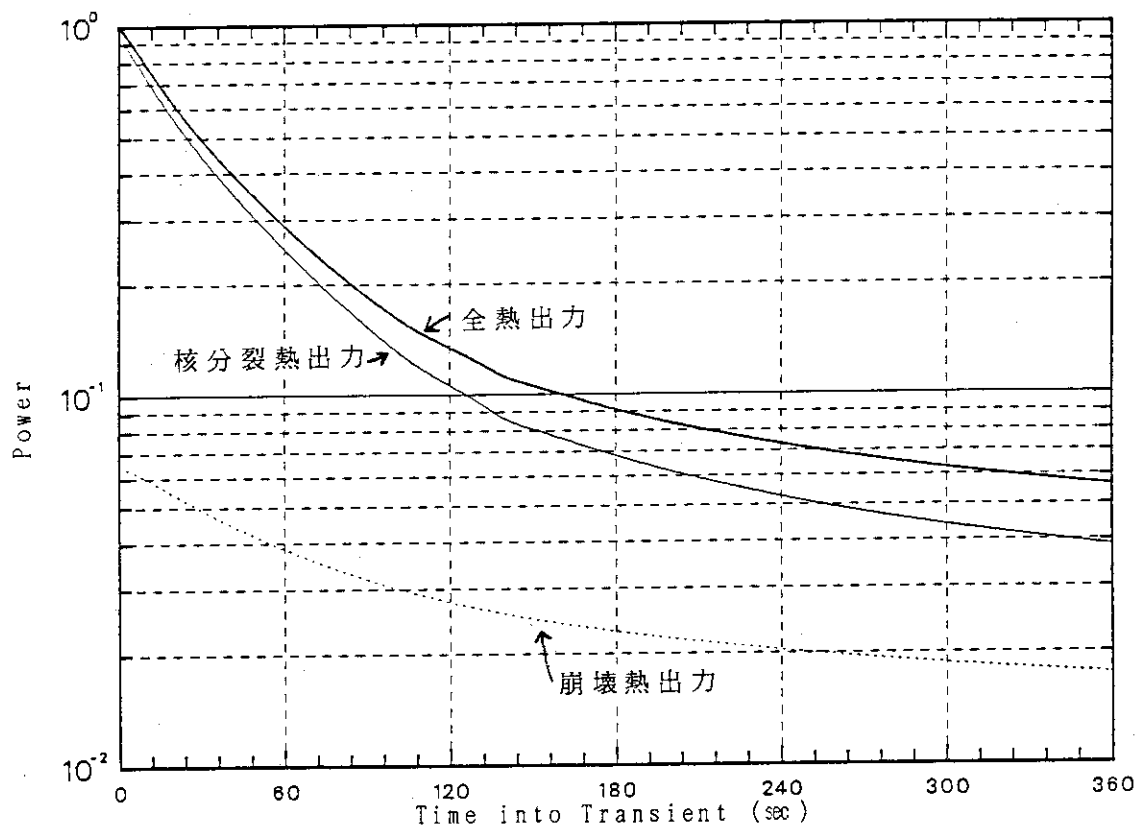
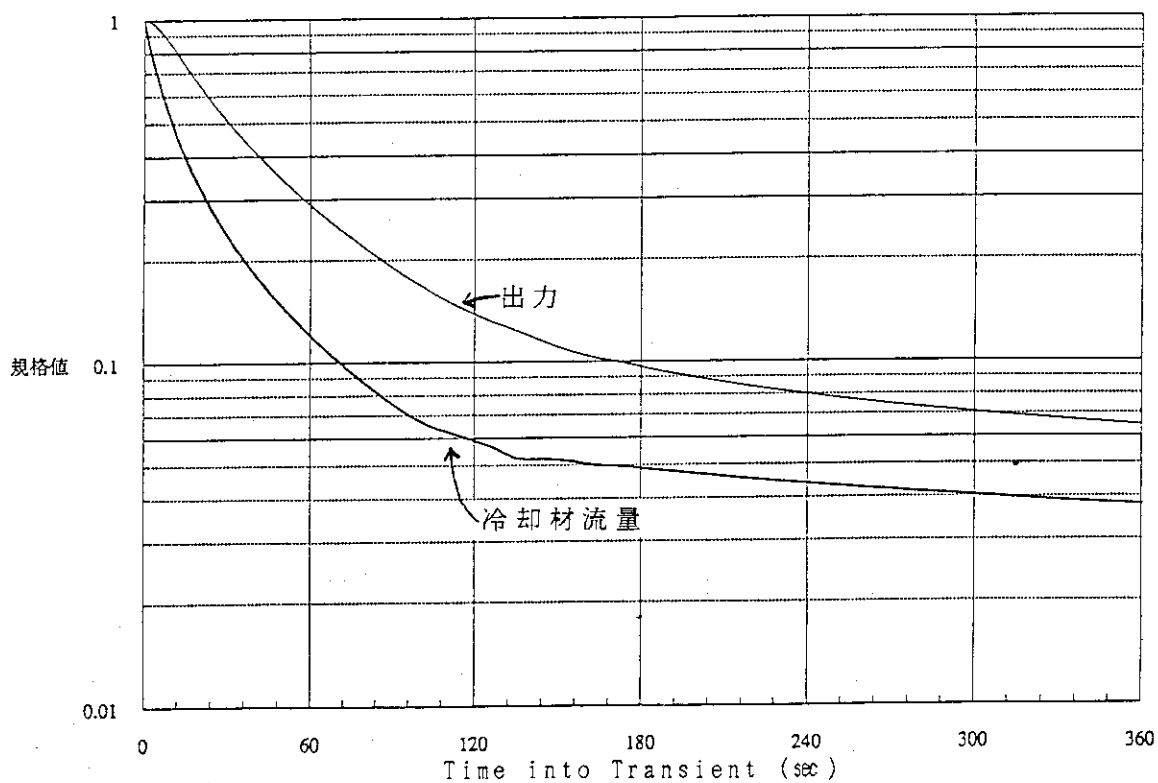


図 2.2.18 1000MWe 金属燃料高速炉でのULOF解析における炉心出力変化
 (上図：電力中央研究所、下図：改造「EXCURS」で解析)

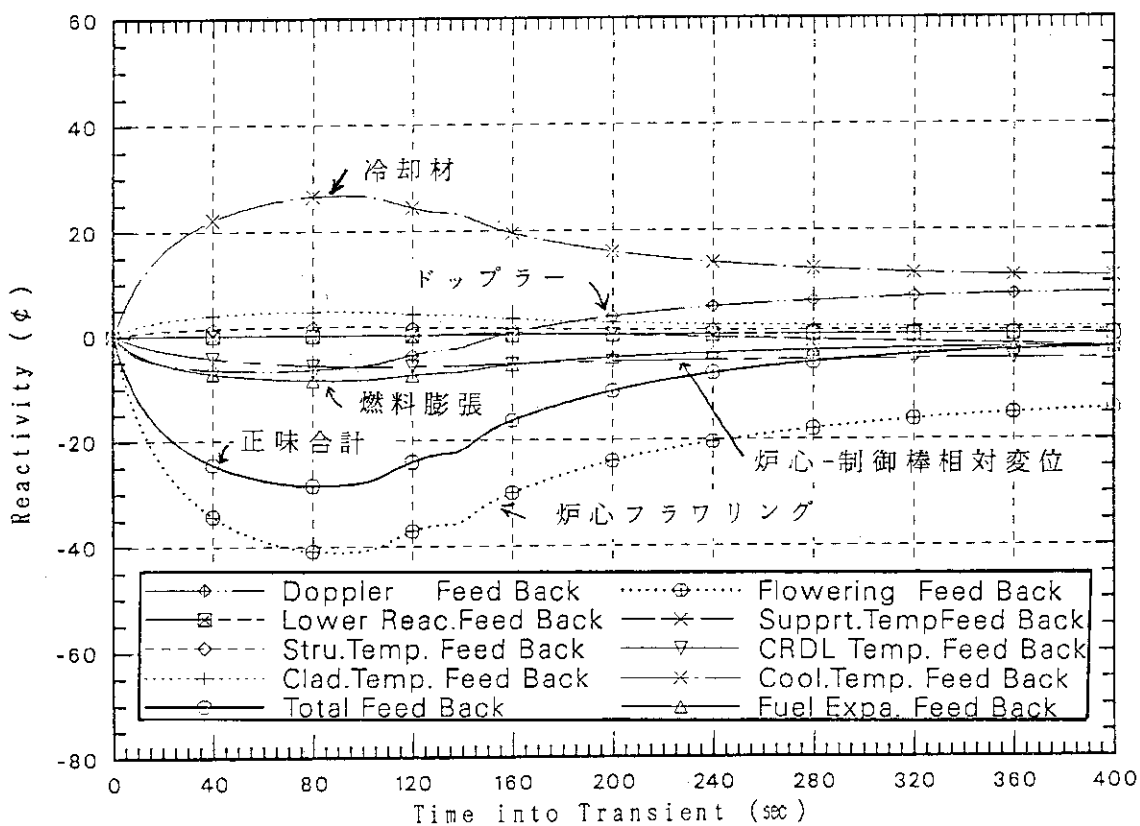
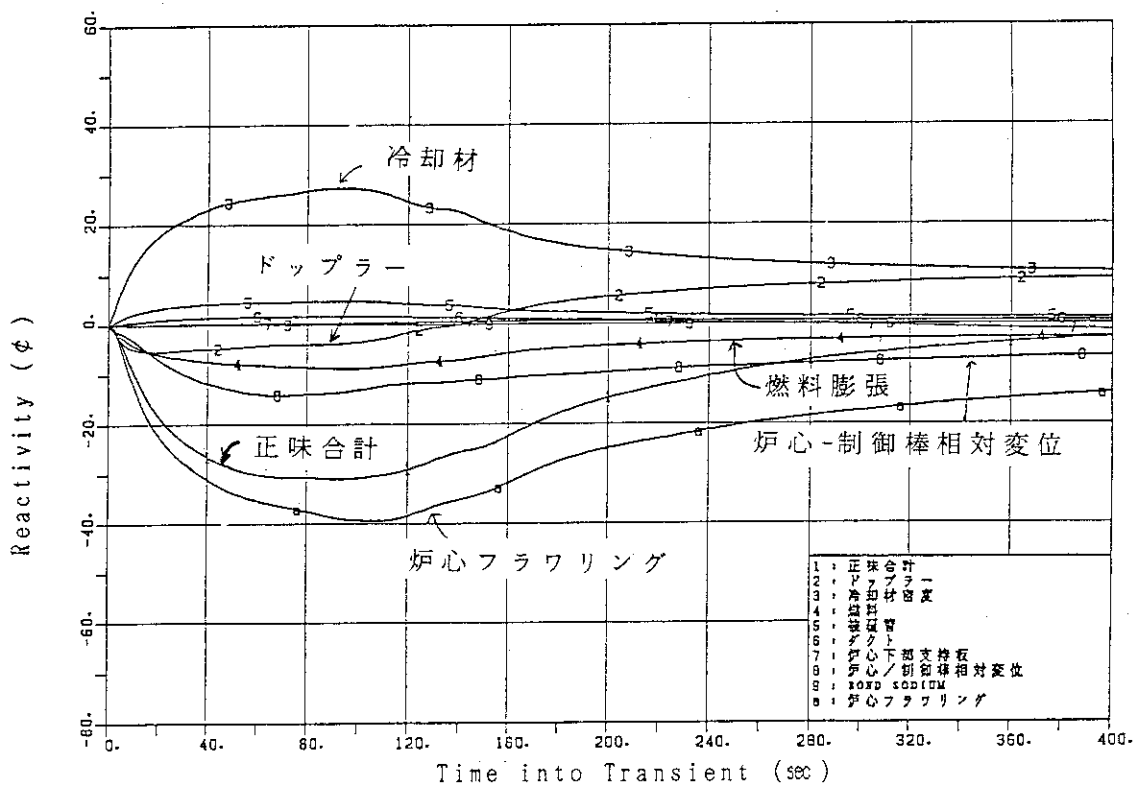


図 2.2.19 1000MWe 金属燃料高速炉でのULOF解析における反応度変化 (上図：電力中央研究所、下図：改造「EXCURS」で解析)

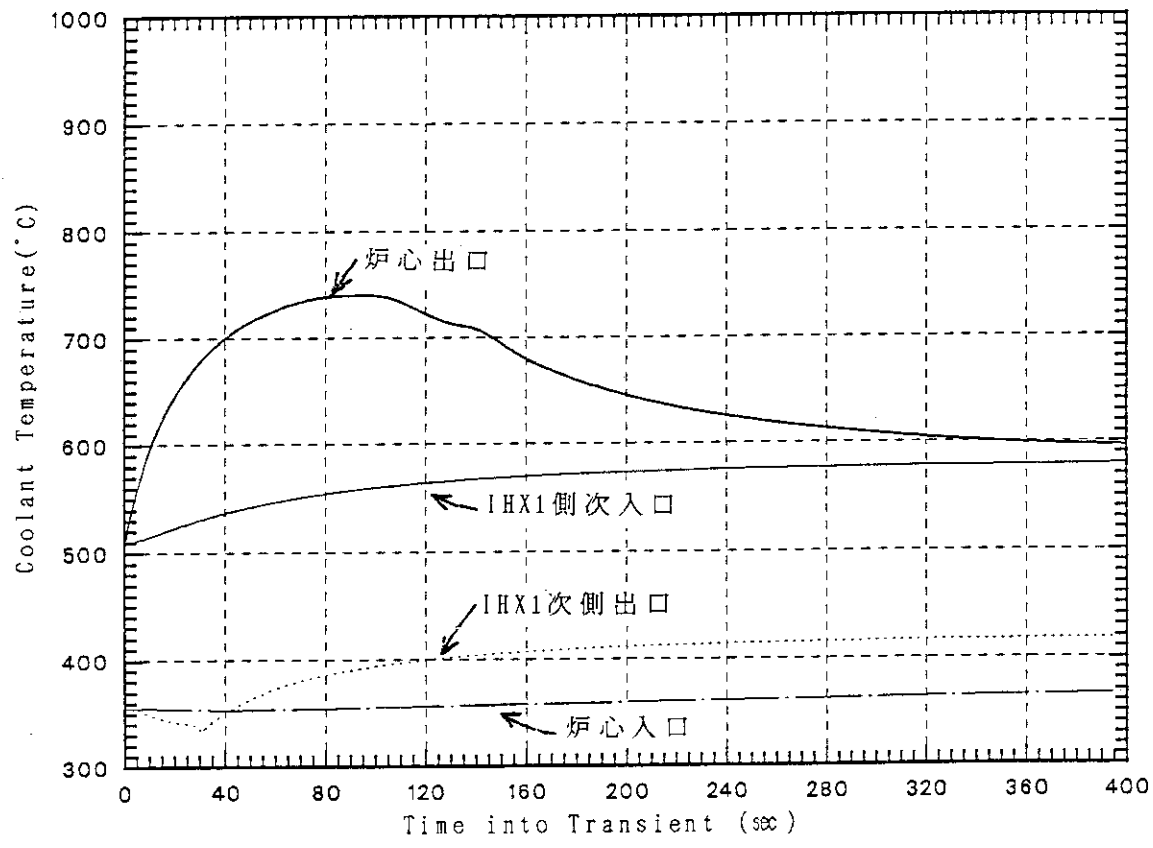
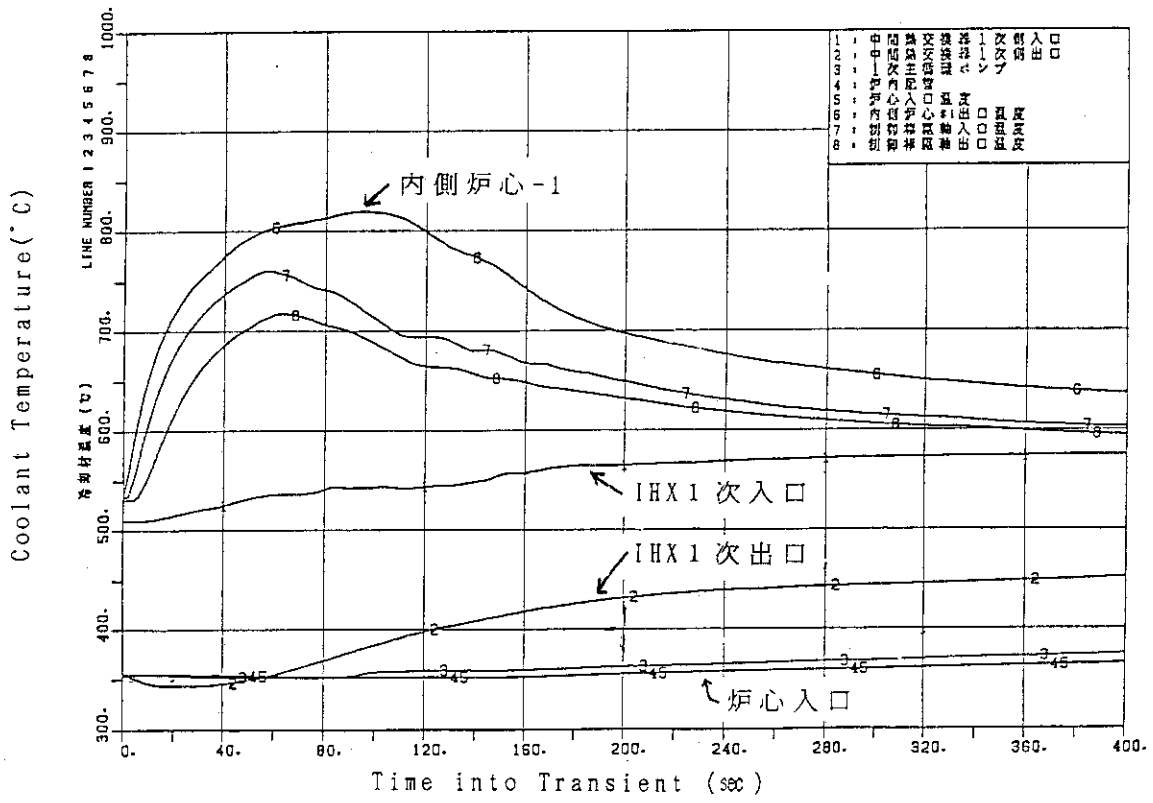


図 2.2.20 1000MWe 金属燃料高速炉でのULOF解析におけるプラント内各部温度変化 (上図：電力中央研究所、下図：改造「EXCURS」で解析)

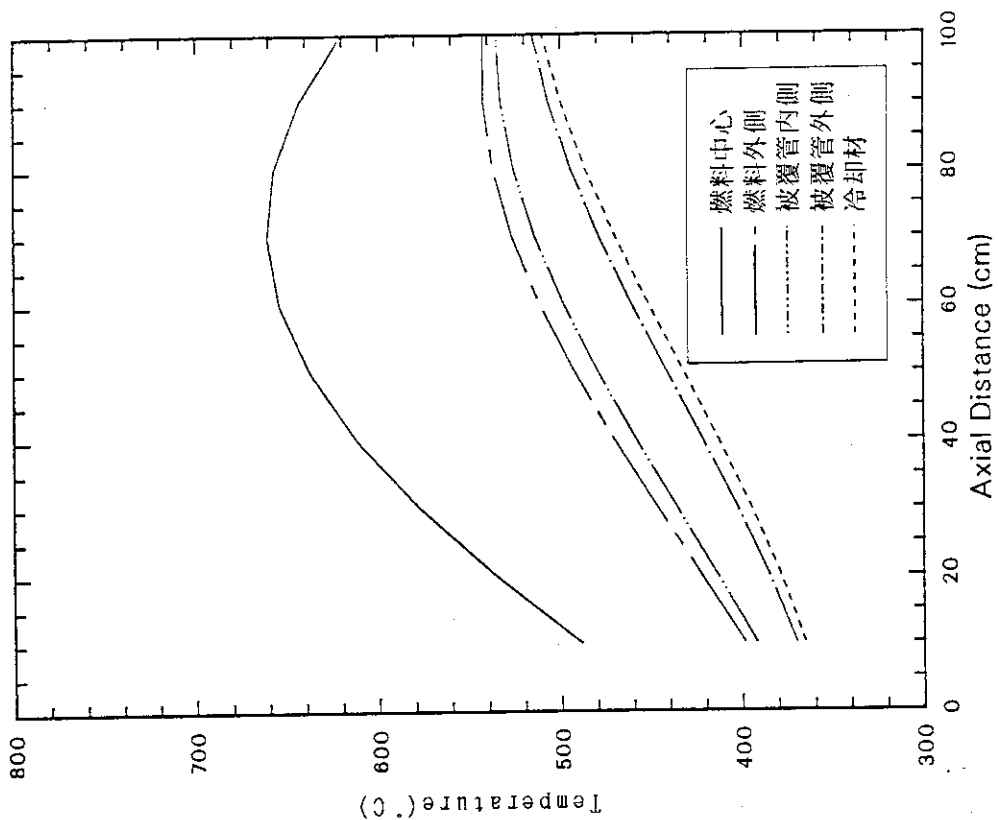
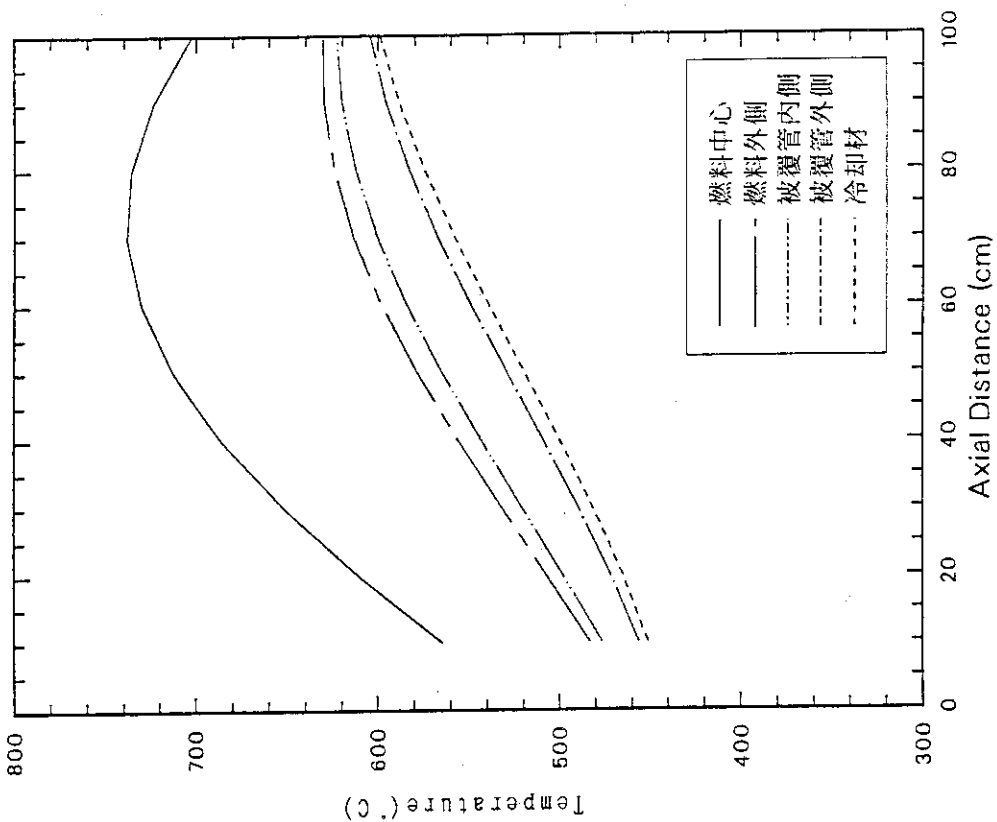


図 2.2.21 1000MWe 金属燃料高速炉のUTOP解析における試験開始直後及び500秒後の炉心軸方向温度分布
(改造「EXCURS」で解析)

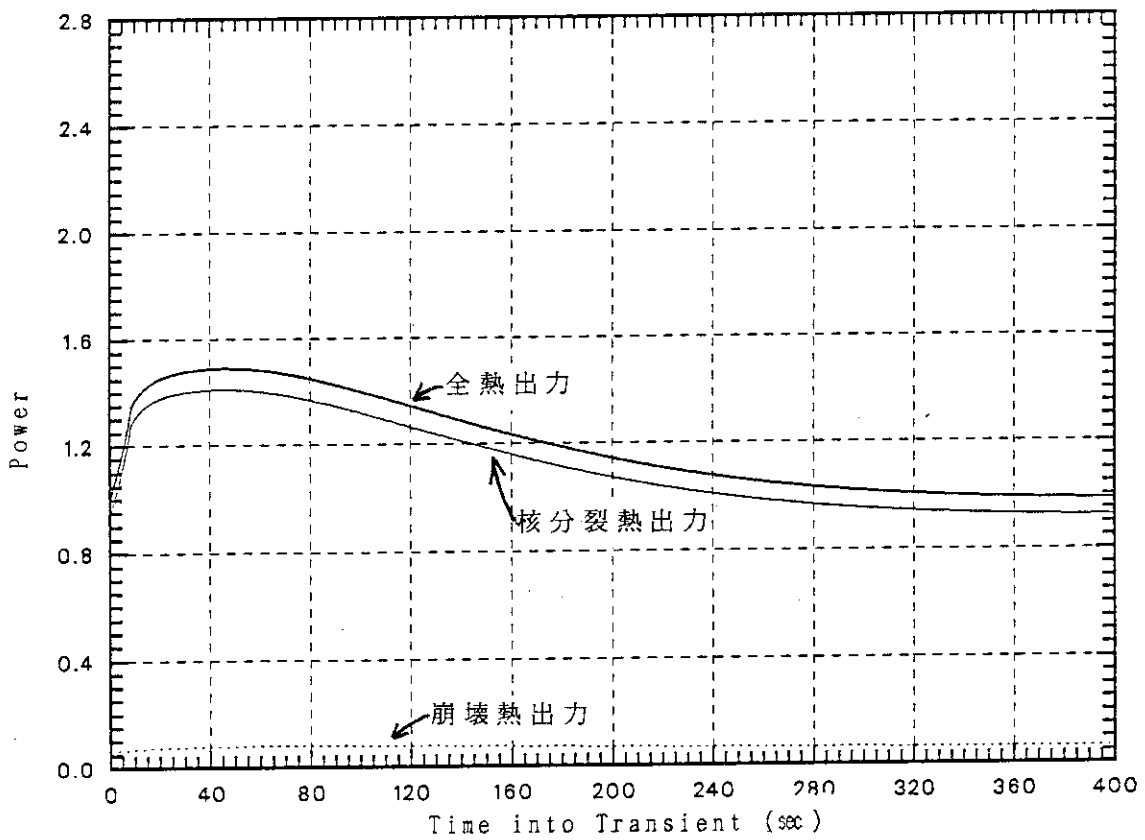
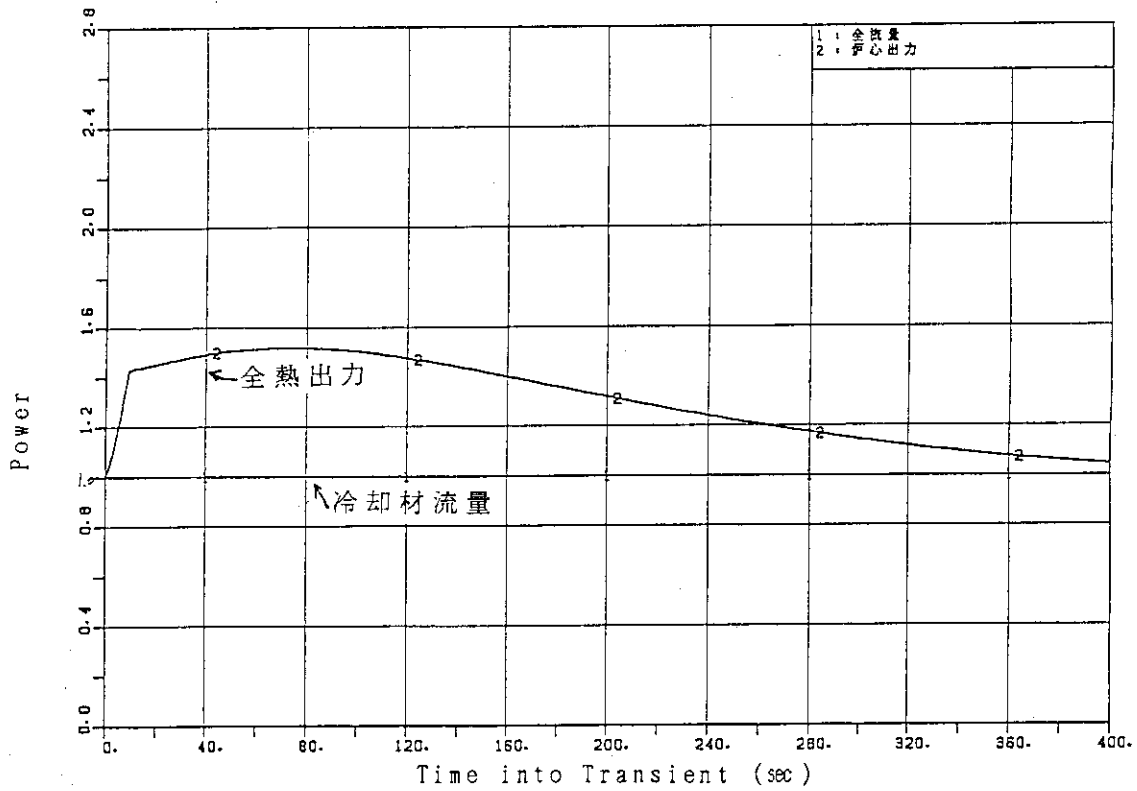


図 2.2.22 1000MWe 金属燃料高速炉でのUTOP解析における炉心出力変化
 (上図：電力中央研究所、下図：改造「EXCURS」で解析)

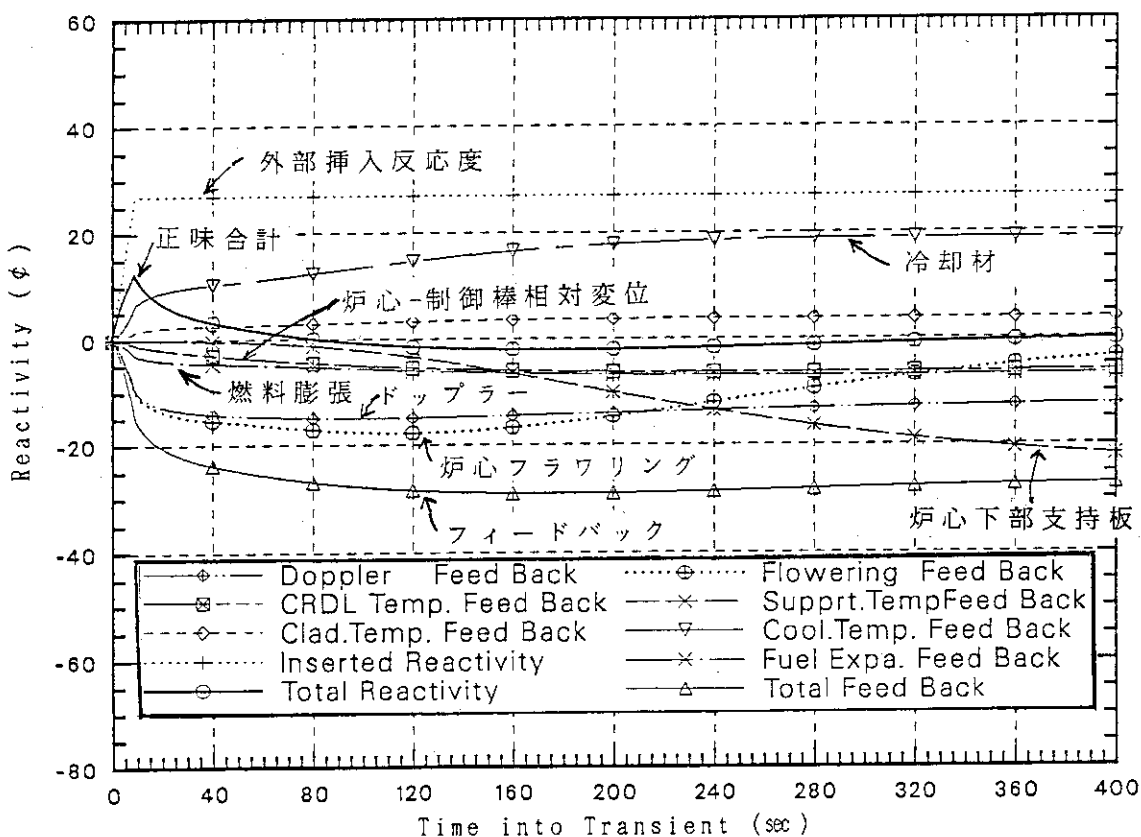
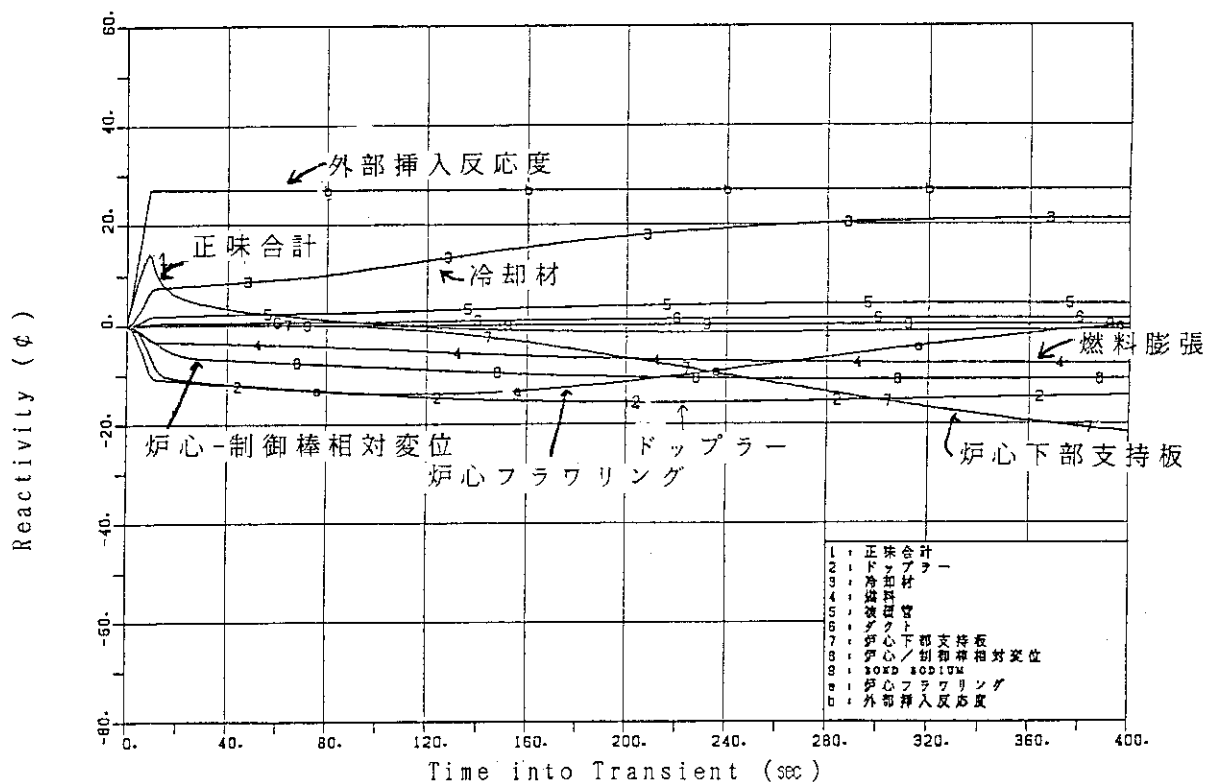


図 2.2.23 1000MWe 金属燃料高速炉でのUTOP解析における反応度変化
 (上図：電力中央研究所、下図：改造「EXCURS」で解析)

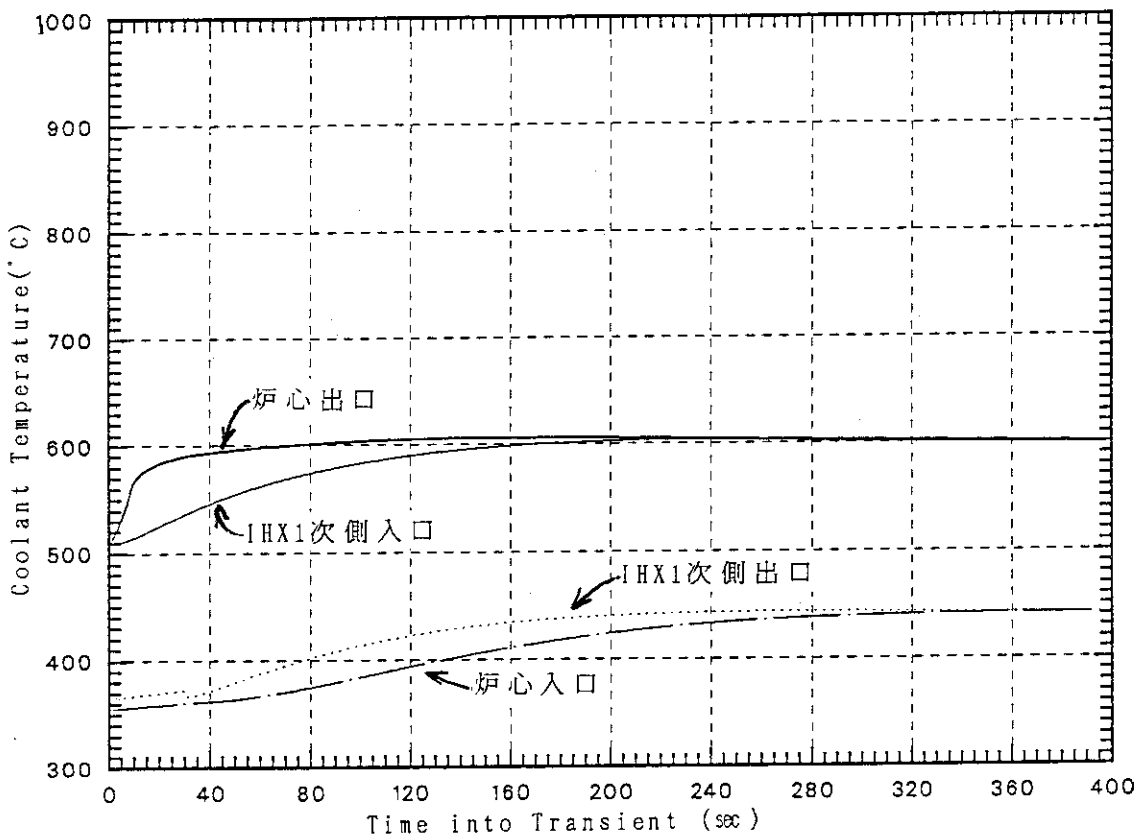
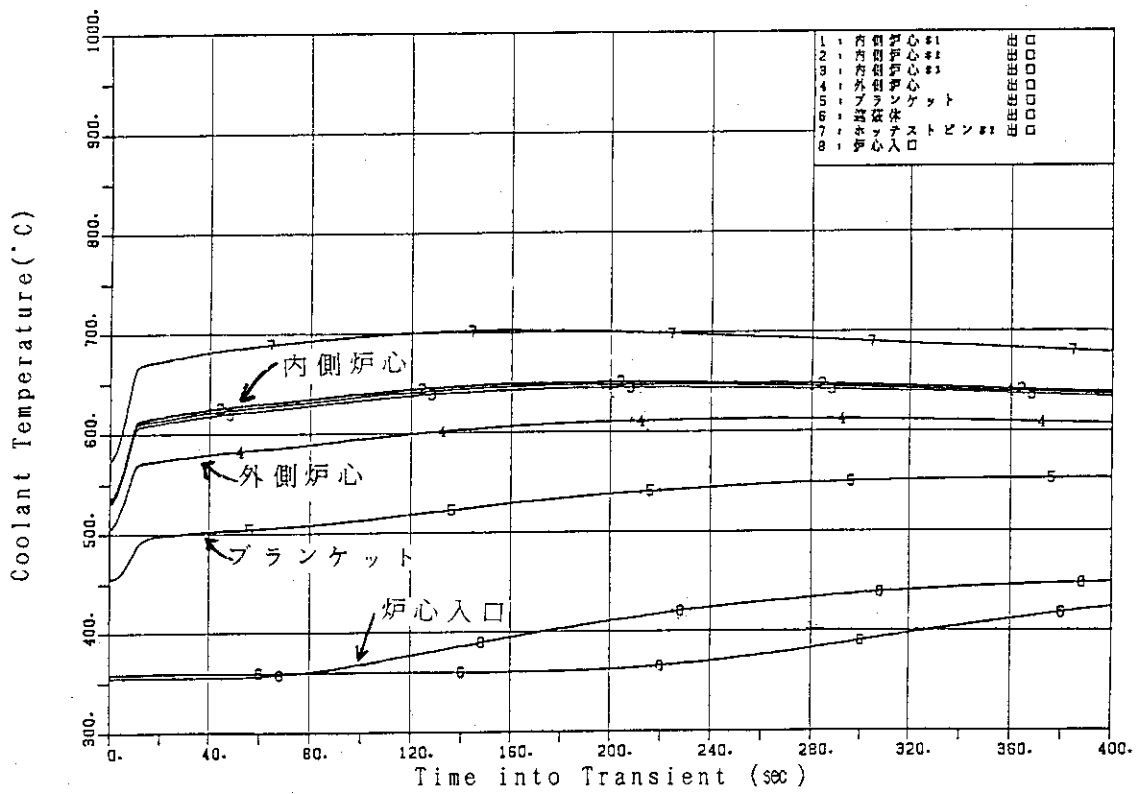


図 2.2.24 1000MWe 金属燃料高速炉でのUTOP解析におけるプラント内各部温度変化 (上図：電力中央研究所、下図：改造「EXCURS」で解析)

2. 3 まとめ

金属燃料高速炉の過渡特性解析を行うために、Na冷却酸化物燃料高速炉用炉心過渡挙動解析コード「EXCURS」を改造した。改造部分は、以下の4つである。

- ① 炉心から出た冷却材がIHXを通して炉心入口に循環する経路の追加、
- ② CRDL、フラワリング等の反応度フィードバックの追加、
- ③ 核分裂生成物の崩壊熱を計算式により導入、
- ④ 金属燃料高速炉用の物性値の温度依存性および熱伝達式の取り込み。

改造の妥当性を検証するために、EBR-IIで行ったULOFおよびULOHS試験を解析し、ANLで行ったこれらの試験解析結果と比較した。また、1000MWe級金属燃料高速炉のUTOPおよびULOF解析を行い、電中研で行った解析結果とも比較した。その結果、ULOF解析ではANLでの解析結果や電中研の解析結果と概ね良い一致を示した。UTOP解析についても、電中研の結果と良い一致を示した。一方、ULOHS解析では、IHX1次側温度変化や主タンク平均温度変化はANLの解析結果とほぼ一致したのに対し、炉心入口温度変化、炉心出力変化、反応度フィードバックの時間変化は良い一致を示さなかった。これは、EBR-II炉心特有の炉心構造等を十分にモデル化できなかったためと考えられる。したがって、本改造「EXCURS」を用いた金属燃料高速炉の炉心過渡特性解析結果は、他で行われたATWS解析結果と良い一致を示し、金属燃料高速炉の過渡特性解析に十分使用できることが分かった。

使用にあたっては、各部での温度評価のモデル化等に若干の留意が必要である。そこで、以下にその留意点を記す。

① フィードバック反応度効果の算出に用いる温度

本改造によって追加した反応度効果を導出する際に使用する温度として平均チャンネル各部の温度を用いた。この温度が、反応度係数に対する代表温度として適当であるか否かに留意する必要がある。以下に具体例を示す。

(7) 炉心下部支持板温度：平均チャンネルの入口温度で代用しているが、EBR-II炉心の場合、高圧プレナムと低圧プレナム部では炉心下部支持板の温度上昇率は異なるので、実際には、炉心下部支持板の温度上昇による反応度変化が複雑になると考えられる。

(1) CRDLの温度：制御棒案内管を流れる冷却材の温度と炉容器上部の冷却材の温度の相互作用によって定まるが、本解析ではこのような温度評価は実施できず、炉容器上部の冷却材温度を使用しているため、CRDL全体としての温度変化量が小さく見積られる。

② プール内での冷却材流量評価

1000MWe級金属燃料高速炉のULOF解析において、プール実効体積は一定として、定常時の値を用いた。今回の解析では流量半減時間が短く、冷却材炉心入口にそれほどの影響を与えないと考えられるが、実際には冷却材が流れるプールの実効体積は低流量時に減少する（電中研の計算では、コールドプールの実効体積は定常時で938 m^3 、ULOF自然循環時で647 m^3 である。）。従って、冷却材半減時間が長い場合には、プールの実効体積の流量依存性に留意を要する。

3. Na冷却金属燃料専焼炉(M-ABR)におけるATWS解析

改造「EXCURS」による計算例として、M-ABRにおけるATWS解析を行った。解析は平衡サイクルの燃焼末期を仮定して、第10サイクルのEOCで行い、解析対象事象としては外部電源喪失を想定したULOFと、制御棒誤引き抜きを想定したUTOPとした。解析で使用したM-ABRの炉心構造やMA燃料の物性値及び反応度係数の一部は、炉心成立性検討時に推定された値や1000MWe級金属燃料高速炉の値を用いた。最後に、M-ABRの炉心設計の検討資料として、解析に使用した物性値や反応度係数を独立に変化させて、解析結果への影響について検討した。

3.1 Na冷却金属燃料専焼炉(M-ABR)

M-ABRはNp、Am、Cmなどのマイナーアクチノイド(MA)を核分裂させるためのNa冷却金属燃料高速炉型の消滅処理炉である^{1)、10)、11)、12)、13)}。

M-ABRは、従来のNa冷却金属燃料高速炉に比べて中性子スペクトルが硬いため、ドップラー係数が小さく、遅発中性子割合も小さい。そこで、M-ABRの過渡時の挙動解析を行い、安全面からM-ABRの炉心設計に資する。表3.1.1にM-ABRの性能諸元、表3.1.2に温度係数、表3.1.3にヒートバランス、図3.1.1にダクトレス集合体図、図3.1.2にプラント・ヒート・バランスを各々示す^{1)、10)、11)、12)、13)}。

3.2 ATWS解析

3.2.1 ULOF解析

外部電源喪失により1次・2次共に冷却材循環ポンプが停止し、さらにスクラムが失敗したと想定したULOF解析を行った。解析では冷却材流量を定常状態から自然循環量まで減少させて、この状況を模擬した。この時の炉心過渡特性を事故発生から400秒まで解析した。

解析条件

- ① 流量半減時間：10秒
但しポンプ特性は、1000MWe級金属燃料炉心解析時の冷却材流量減少カーブと等しいとした。
- ② 流量変化の様子：図3.2.1を参照。
- ③ 2次側流量変化：1次側流量変化カーブと同一とした。

解析結果：

- ① 初期軸方向温度分布と400秒後の軸方向温度分布：図3.2.2および図3.2.3
- ② 出力の時間変化：図3.2.4

- ③ (出力/流量)の変化: 図3.2.5
- ④ 反応度の時間変化: 図3.2.6
- ⑤ プラント内各部温度変化: 図3.2.7

・計算の結果、出力変化は常に単調減少であった。(出力/流量)変化は、定常状態を1.0とした場合、出力の減少以上に流量減少が大きく、74秒後に1.97まで上昇する。

全フィードバック反応度は、常に負で、94秒後に最大-44 ϕ である。フィードバック反応度の中で最も大きいのはフラワーリングに因るもので、最大-38 ϕ を与える。

3.2.2 UTOP解析

制御棒誤引き抜き事故を想定したUTOP解析を行った。制御棒誤引き抜きにより炉心にランプ状の正の反応度が挿入されたと仮定して、事象発生から400秒までの過渡特性解析を行った。

解析条件

- ① 印加反応度: 0秒から9秒までは3 ϕ /secの速さで印加。9秒以後は27 ϕ 印加。

解析結果:

- ① 初期軸方向温度分布と400秒後の軸方向温度分布: 図3.2.8および図3.2.9
- ② 出力の時間変化: 図3.2.10
- ③ 反応度の時間変化: 図3.2.11
- ④ プラント内各部温度変化: 図3.2.12

計算の結果、反応度印加開始とともに出力は上昇し、定常状態の出力(核分裂出力+FP崩壊熱出力)を1.0とした場合に、73秒後には最大となり、その値は1.48である。その後、出力は下降し400秒後には1.14に減少する。

正味の反応度は、反応度印加にともなって上昇し9秒後には最大値12.5 ϕ になる。その後減少に転じて、400秒後には-1 ϕ まで減少する。事象開始から200秒まではフラワーリングによる効果が大きく、それ以後は炉心下部支持板とCRDLによる効果が支配的である。フラワーリングによる効果は、炉心下部支持板の膨張が大きくなるに従って、減少する。

3.3 物性値及び温度係数等の解析結果への影響

事故時の炉心安全性解析では、ATWS事象発生後、炉心および炉心構造物が健全に維持されるかを知ることが重要である。EXCURSでは、ホットチャンネルやホットテストチャンネルを用いて、各部の最高温度の時間推移を調べることができる。たとえば、現設計段階のM-ABRについて、ULOFおよびUTOP解析でのホットチャンネルを用いて各部の最高温度の時間推移を調べると、以下

に示す結果を得る。ここで、燃料・炉心構造物等が健全に保持される上限温度として、

- ① 燃料融点：900℃
- ② 冷却材沸騰温度：930℃
- ③ 被覆管共晶温度：725℃
- ④ 炉内構造物が健全に保持される上限温度：650℃

を想定した。¹²⁾

U L O F 解析

ホットチャンネルによる各部の最高温度の時間変化を図3.3.1に示す。

- ① 燃料スラグ：定常状態での865℃から出力の減少に伴い単調に減少し、400秒後には被覆管温度と同じ500℃に至る。
- ② 被覆管：定常状態の496℃から事象発生後96秒で646℃まで上昇し、その後減少して400秒後には500℃になる。
- ③ 冷却材温度：定常状態で430℃であったのが96秒後には558℃まで上昇し、その後減少に転じて400秒後に450℃となる。

U T O P 解析

ホットチャンネルによる各部の最高温度の時間変化を図3.3.2に示す。

- ① 燃料スラグ：定常状態の865℃から上昇を始め、78秒後には1089℃に到る。その後、温度は減少し、400秒後には966℃になる。
- ② 被覆管：定常状態の496℃から温度上昇を始め、102秒後に591℃に到る。その後緩やかに減少して、400秒後には570℃になる。
- ③ 冷却材：定常状態の430℃から上昇し、198秒後に498℃に至る。その後緩やかに減少して、400秒後には495℃になる。

現設計段階のM-A B Rでは、U L O F事象では常に炉心全ての温度が上限温度以下であるのに対して、U T O P事象では燃料最高温度が燃料融点を超えるという結果を得る。本章の冒頭で述べたように、本解析で使用した物性値等には未確定のものがあることを鑑みると、ここでは、M-A B Rの安全性について判断することは尚早である。例えば、燃料の熱伝導率が解析に使用した値より33%大きいと仮定すると、U L O F解析による燃料最高温度は964℃となり、融点に近い値をとる。そこで、安全面からM-A B Rの炉心設計に資するために、M A 燃料の物性値及び解析上の不確かさがA T W S解析結果に与える影響について、パラメータサーベイを行う。ここでは、前節で行ったM-A B Rの過渡解析を基準として、温度係数・物性値データを個々に変化させた場合の燃料・被覆管・冷却材の各温度変化、反応度フィードバックに与える影響について調べた。

解析対象パラメータとしては次のものを選んだ：

- ① 燃料熱伝導率：金属燃料高速炉(L M R)では、未照射の(U, Pu)-Zr燃料の熱伝導率は燃焼が進むと一旦小さくなり、その後大きくなる。10%燃焼時

の燃料熱伝導率は未照射時の0.72倍程度と言われている。

一方、MA燃料の熱伝導率の実験データは存在しないが、LMR燃料に比べて低い値であろうと予測されている^{11)・12)}。本解析では、MA燃料の熱伝導率を10%燃焼時のLMR燃料の1/2倍¹²⁾（未照射のLMR燃料の0.36倍）として解析を行った。この熱伝導率を、1/2倍から2/3倍に上げた場合について解析を行った。

- ② ドップラー反応度係数：M-ABR炉心のドップラー反応度係数は、LMRに比べて1/20以下と小さな値である。^{11)・10)・13)}このため、全フィードバック反応度の中でドップラー反応度が占める割合がLMRに比べてかなり小さく、ドップラー反応度が過渡特性に与える影響を把握することが難しい。そこで、LMRと同程度のドップラー係数として解析を行い、ドップラー反応度係数の過渡特性への影響について検討した。
- ③ 燃料軸方向膨張係数：金属燃料高速炉では、燃焼が進むと燃料スラグと被覆管が密着し、燃料スラグは被覆管に引っ張られて軸方向に伸びると考えられる。現設計段階では被覆管にHT-9鋼の使用^{11)・12)}を考えているが、確定ではない。そこで、その他の材質に変更された場合に、過渡特性への影響を知るために、燃料軸方向膨張係数が基準解析の1.5倍及び0.5倍の場合について解析を行った。
- ④ 冷却材温度係数：M-ABRでは燃料集合体はダクトレス型を採用^{11)・12)}しているが、まだ詳細な形状は未定であり、したがって集合体内を流れる冷却材の流れも未定である。そこで、冷却材の温度上昇によるフィードバック反応度が解析結果に対してどの程度影響を及ぼすかを把握するために、冷却材温度係数を基準解析の1.5倍及び0.5倍の場合について解析を行った。
- ⑤ 炉心支持板温度係数：現設計段階では、炉心支持板の構造等はその細部にまでは最終確定していない。このため、炉心支持板温度係数はその構造設計により値が異なる。そこで、炉心支持板温度係数が基準解析の1.5倍及び0.5倍の場合について解析を行った。
- ⑥ フラワリング係数：温度上昇によって炉心上部が外側に向かって広がる現象を模擬したものである。ダクトレス型炉形による本現象のモデル化の妥当性については検討をしていない。そこで、フラワリング係数が1.5倍及び0.5倍となった場合の解析を行った。
- ⑦ 遅発中性子割合：MA燃料の遅発中性子に関するデータはほとんど存在しない。そこで、遅発中性子割合を基準解析の値の1.5倍及び0.5倍の場合について解析を行った。

上記のサーベイ計算を行い、その結果を各項目毎に図3.3.3～図3.3.5にまとめた。

- ① 燃料熱伝導率：燃料熱伝導率をLMR燃料の1/2から2/3に上げた事により、定常状態の燃料最高温度が91℃低下した。ULOFに与える影響は、燃料最高温度が低くなることであるが、約150秒後には熱伝導率がLMR燃料の1/2の場合と同じ温度になる。UTOPについては、約80秒後の燃料最高温度が130℃低下した。燃料最高温度以外の諸特性には影響がなかつた。

た。

- ② ドップラー反応度係数：U L O F 解析において、金属燃料高速炉では燃料熱伝導率が良いので、冷却材温度の上昇にともない燃料平均温度が上昇し、ドップラー反応度は負になる。一方、M-A B R の燃料熱伝導率は低いために、金属燃料高速炉のように冷却材温度の上昇にともなう燃料温度の上昇は見られない。むしろ、全フィードバック反応度が負になるため、炉心出力が低下し、その結果、燃料平均温度が低下すると考えられる。したがって、ドップラー反応度に関しては正の反応度に寄与する。
U T O P 解析においては、全フィードバック反応度が正のため、それほど影響がなかった。
- ③ 燃料軸方向膨張係数：U T O P 解析での燃料スラグ最高温度が約 30°C 変化するが、その他の場合では、 10°C 内外の影響を与える。
- ④ 冷却材温度係数：U T O P 解析において、1.5倍の温度係数を用いた場合、基準解析結果に比べて、燃料スラグ最高温度が 50°C 上昇するが、その他の場合は、 20°C から 30°C の範囲の変化である。
- ⑤ 炉心支持板温度係数：U T O P 解析およびU L O F 解析ともに、この影響は、非常に小さい。
- ⑥ フラウリング係数：U L O F ・ U T O P 解析ともに、燃料・被覆管・冷却材の温度変化に一番影響がある。フラウリング反応度が50%低下するとU T O P 時に燃料最高温度が 125°C 上昇する。
- ⑦ 遅発中性子割合：U T O P 解析では各部の最高温度変化への影響は小さいが、U L O F 解析ではフラウリング係数の変化による影響と同程度である。U L O F 時では、遅発中性子割合が50%小さくなると出力下降速度が大きくなり、基準解析の結果より低出力に至る。また、燃料温度変化も同様の減少傾向を示す。燃料温度下降速度は被覆管及び冷却材温度上昇速度より大きいいため、被覆管及び冷却材最高温度は基準解析の結果より約 80°C 低くなる。遅発中性子割合が50%大きい場合は、逆に約 50°C 高くなる。

以上から、M-A B R に対して、フラウリング係数、遅発中性子割合、燃料熱伝導率が燃料最高温度に強く影響を与えることが分かる。一方、炉心支持板温度係数は解析結果への影響が小さいことが分かる。また、燃料熱伝達率の相違から金属燃料高速炉とM-A B R のドップラー係数による反応度フィードバックの傾向が異なることが分かる。

表 3.1.1 Na-冷却金属燃料専焼炉 (M-ABR) 性能諸元

燃料構成		ピン・バンドル	
燃料組成	内側炉心	Np-22Pu-20Zr*	
	外側炉心	AmCm-35Pu-5Y**	
ピン直径, mm		4.0	
バンドル直径, mm		5.2	
バンドル間隔, mm		6.0	
炉心	長さ, cm	内側炉心/外側炉心	34.0/26.1
	半径, cm	内側炉心/外側炉心	32.3/43.6
TRU 初期装荷重量, kg	²³⁷ Np		255
	Am and Cm		199
	Pu		212
	Total		666
熱出力, MWth			170
出力密度, MW/m ³	内側炉心, ave./max.		978/1279
	外側炉心, ave./max.		961/1250
線出力, kW/m	内側炉心, ave./max.		34/45
	外側炉心, ave./max.		34/44
燃料最高温度, °C	内側炉心		834
	外側炉心		794
被覆材最高温度, °C	内側炉心		517
	外側炉心		477
冷却材流速, m/s			8
冷却材入口温度, °C			300
冷却材出口温度(ネットフロー), °C	内側炉心		484
	外側炉心		440
冷却材炉心出口温度			430
全中性子束(炉心平均), 10 ¹⁵ n/cm ² ·s	内側炉心		4.1
	外側炉心		3.4
平均 反応エネルギー, keV	内側炉心		766
	外側炉心		785
サイクル長, 全出力日			730
燃焼反応度変化, % Δk/k			-2.7
1サイクル当り燃焼率***, %	内側炉心		19.0
	外側炉心		16.3

燃料許容温度 900°C

被覆管許容温度 650°C (HT-9)

*) 第2サイクル以降はNpのみ追加する。

**) 第2サイクル以降はAm, Cmのみ追加する。

***) 燃焼率=TRU追加量(kg)/666(kg)

表 3.1.2 M-A B R の温度係数

項目	温度係数 ($10^{-6} \Delta k/k \cdot ^\circ C$)
ドップラー	$-1.309 \times 10^{-4} Tdk/dT$
燃料軸方向膨張	-2.51 (被覆管の伸び)
Na ボンド	0.0
被覆管膨張	1.878
炉心のNa密度	+4.69
制御棒延長棒の膨張	-4.79
炉心支持板の膨張	-9.53
炉心上部径方向膨張	-5.45

表 3.1.3 M-A B R のヒートバランス

① 炉心 (平均チャンネル)			
入口温度/出口温度 ($^\circ C$)		300/430	
流量 (kg/sec)		1176.2 (Total)	
② プール			
		ホットプール	コールドプール
容積 (m^3)		200	200
温度 ($^\circ C$)		430	300
流量 (kg/sec)		1176.2	1176.2
③ 中間熱交換器 (I H X)			
一次側入口温度/出口温度 ($^\circ C$)		430/300	
流量 (kg/sec)		1176.2	
二次側入口温度/出口温度 ($^\circ C$)		288/392	
流量 (kg/sec)		1483	
④ 炉心入口パイプ			
長さ/直径 (m)		13/0.3	
流速 (m/sec)		8.0	
流量 (kg/sec)		1176.2	

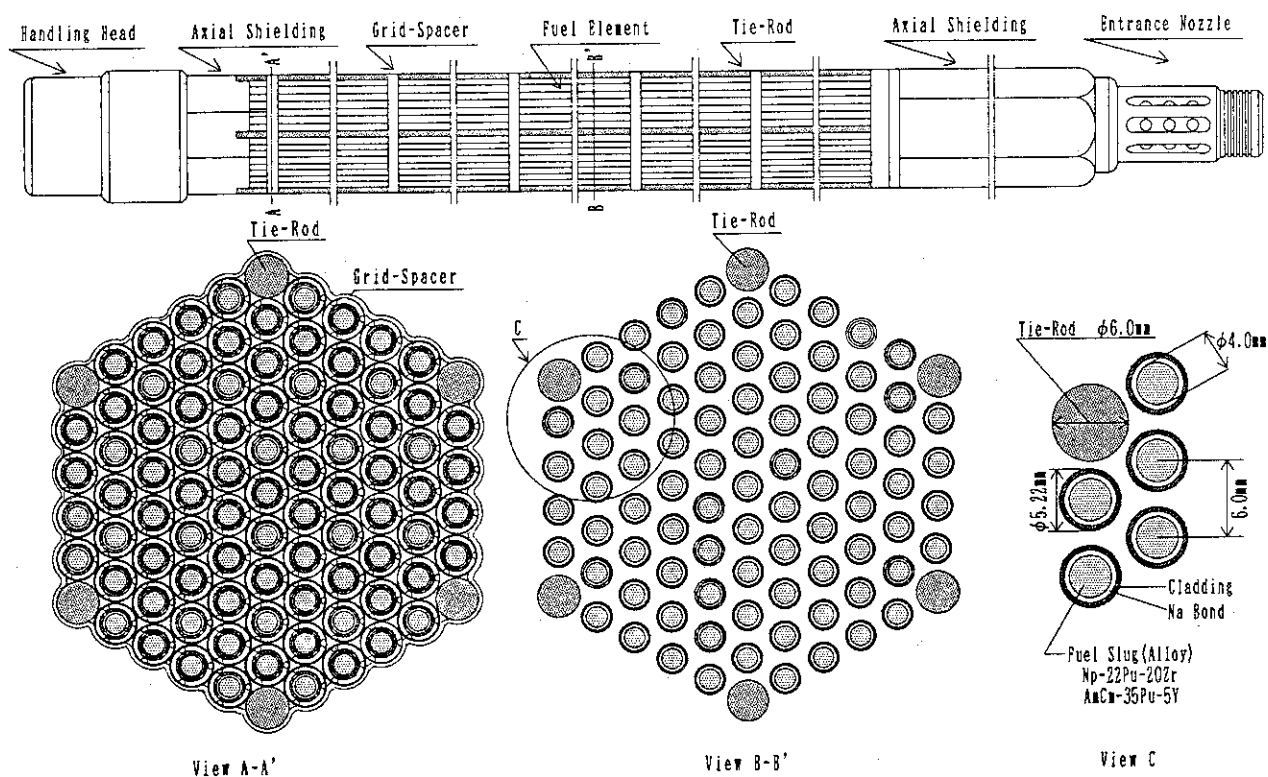


図 3.1.1 M-ABRのダクトレス集合体

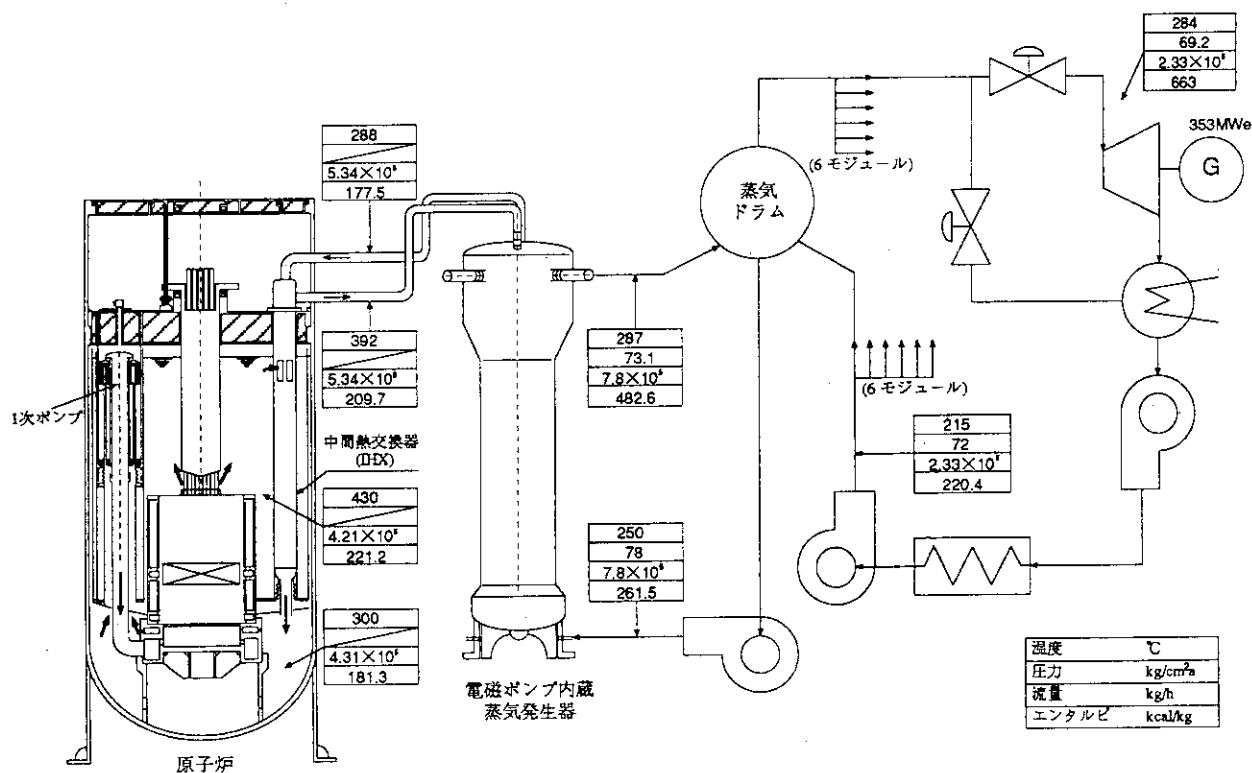


図 3.1.2 M-ABR 定格プラントヒートバランス

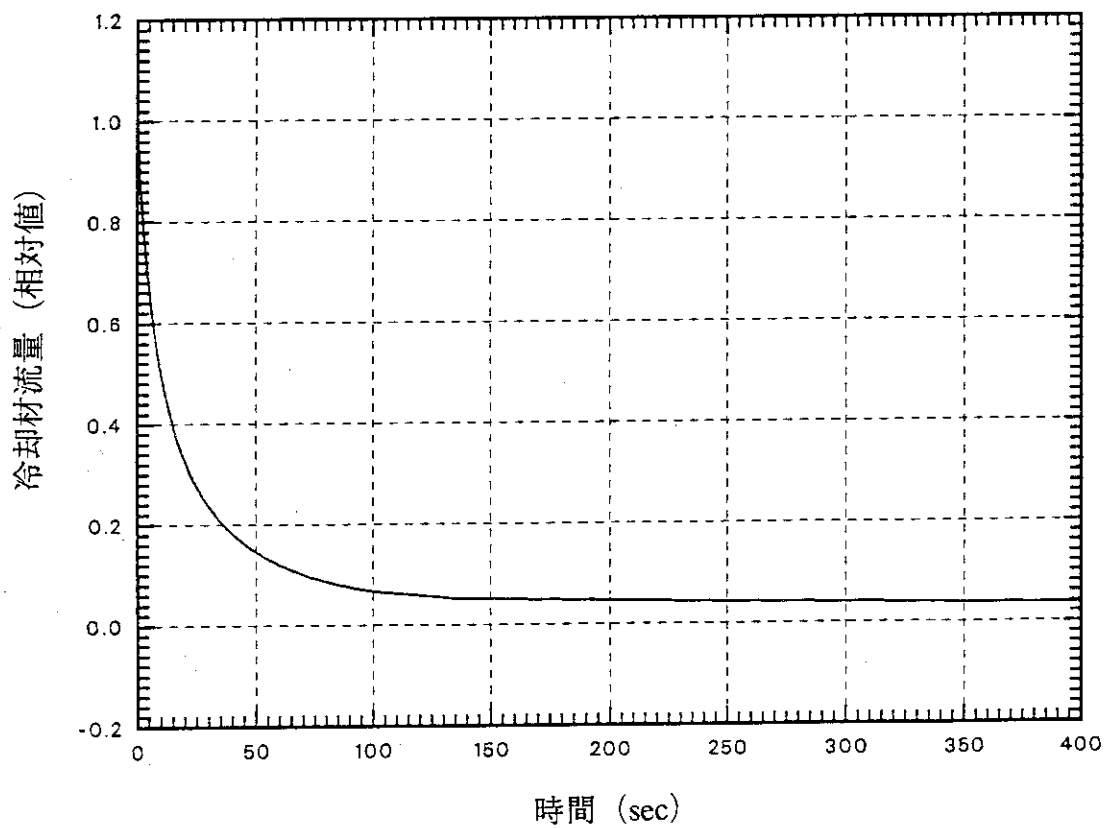


図 3.2.1 M-ABRのULOFにおける冷却材流量変化

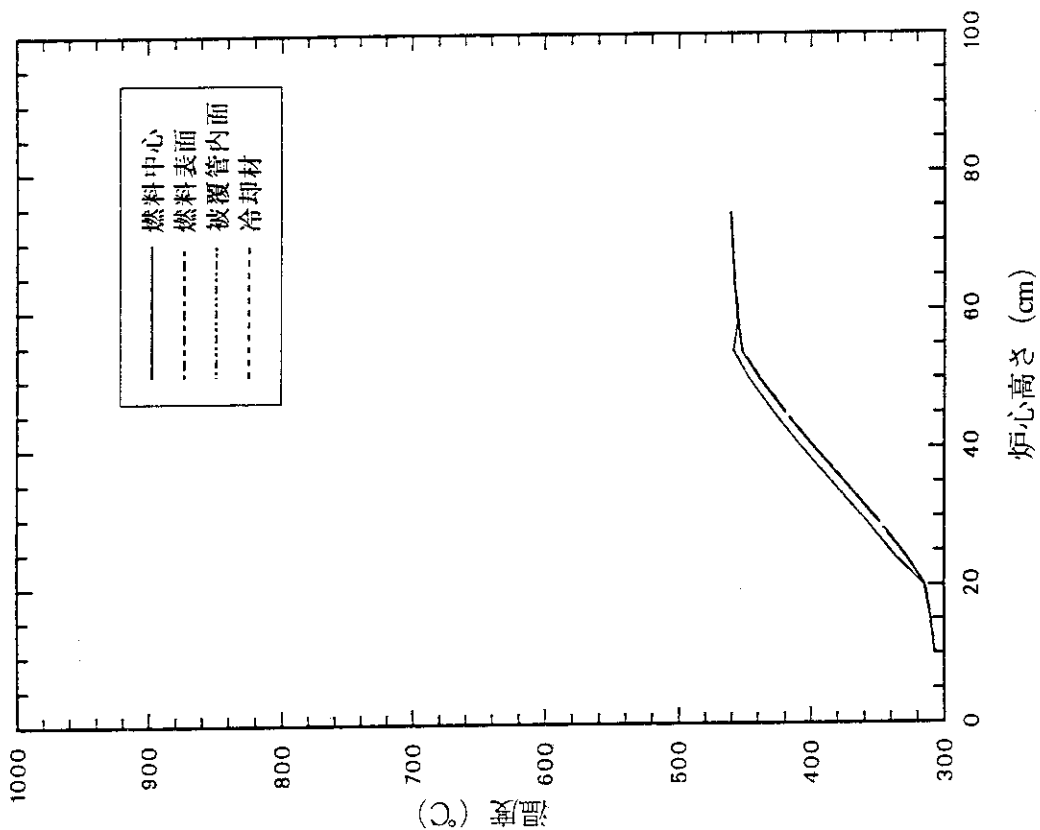


図 3.2.2 M-ABRのULOF事象発生前の軸方向温度分布
(平均チャンネル)

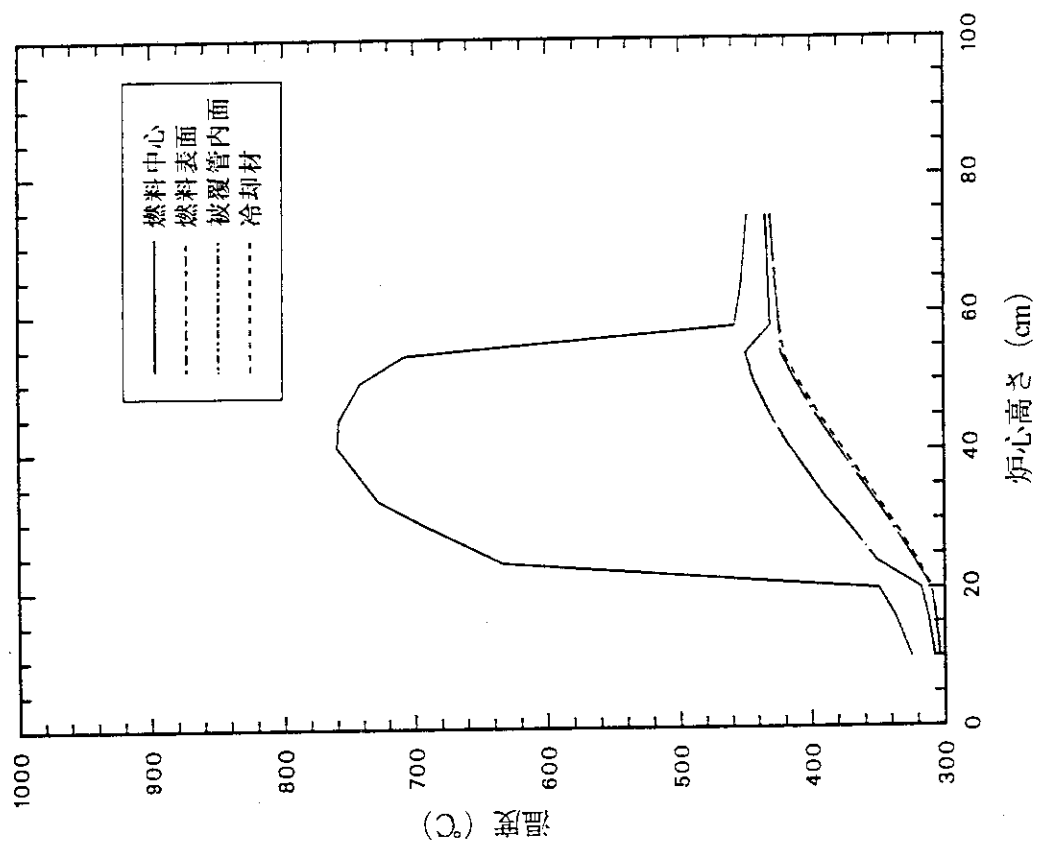


図 3.2.3 M-ABRのULOF事象発生400秒後の軸方向温度分布
(平均チャンネル)

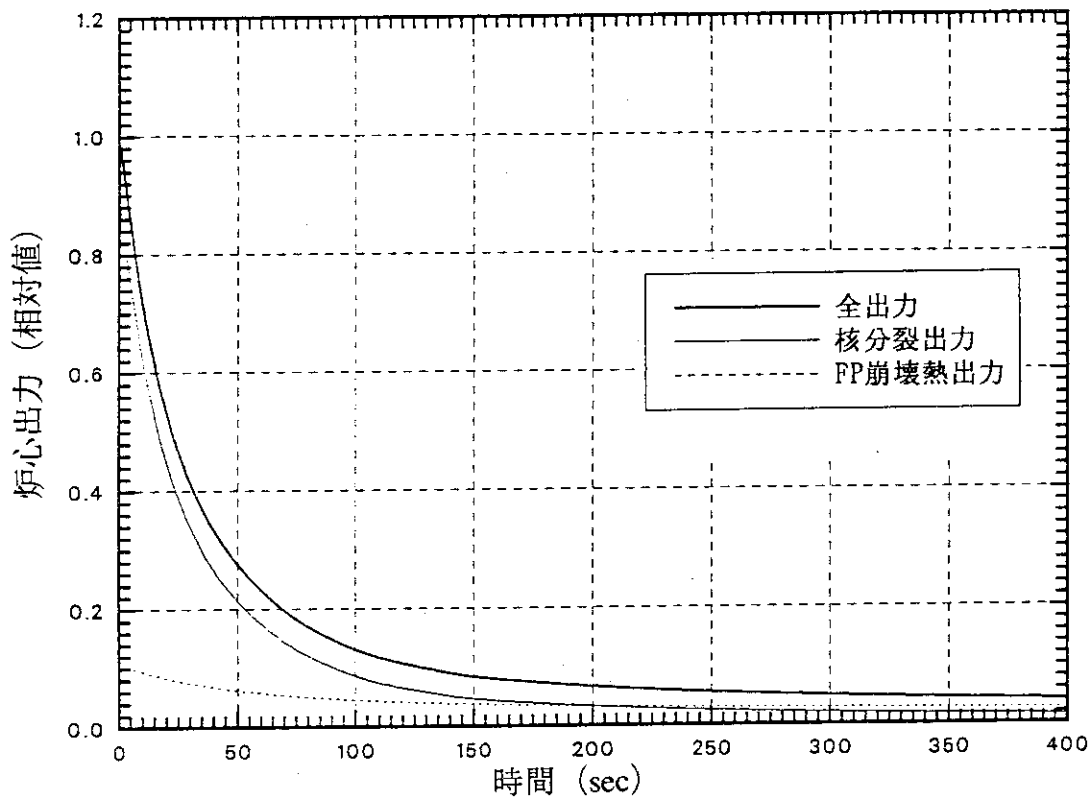


図 3.2.4 M-ABRのULOFにおける炉心出力変化

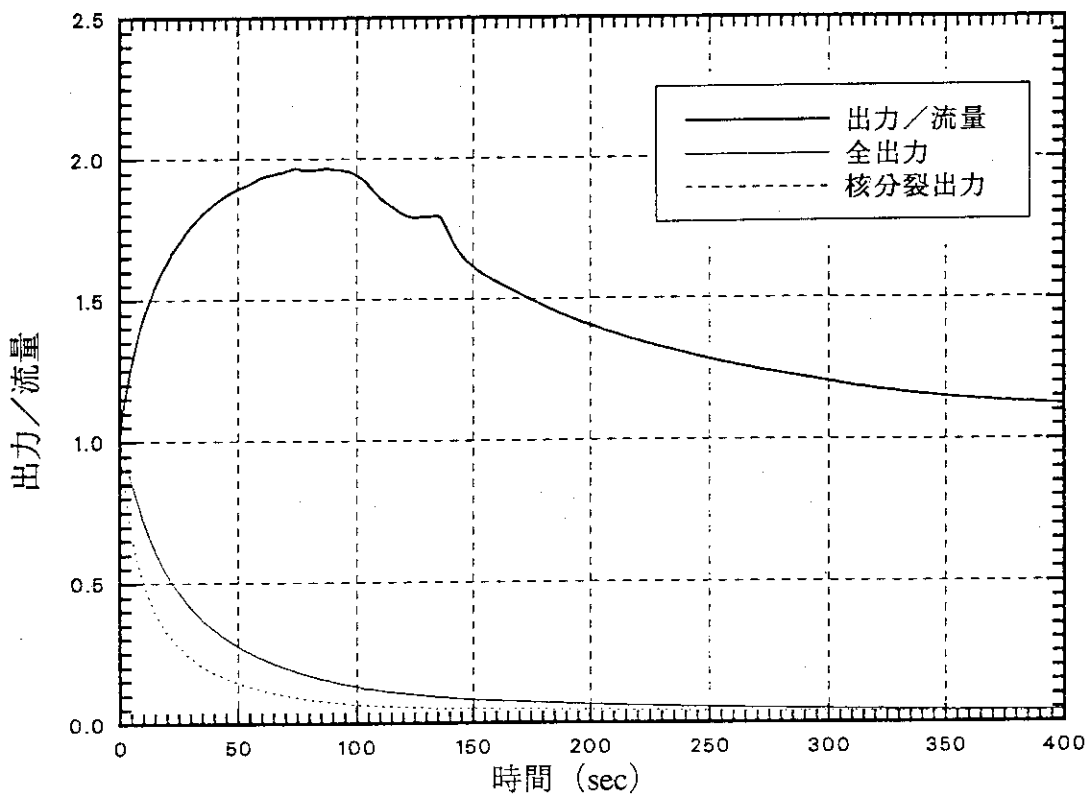


図 3.2.5 M-ABRのULOFにおける [出力/流量] 変化

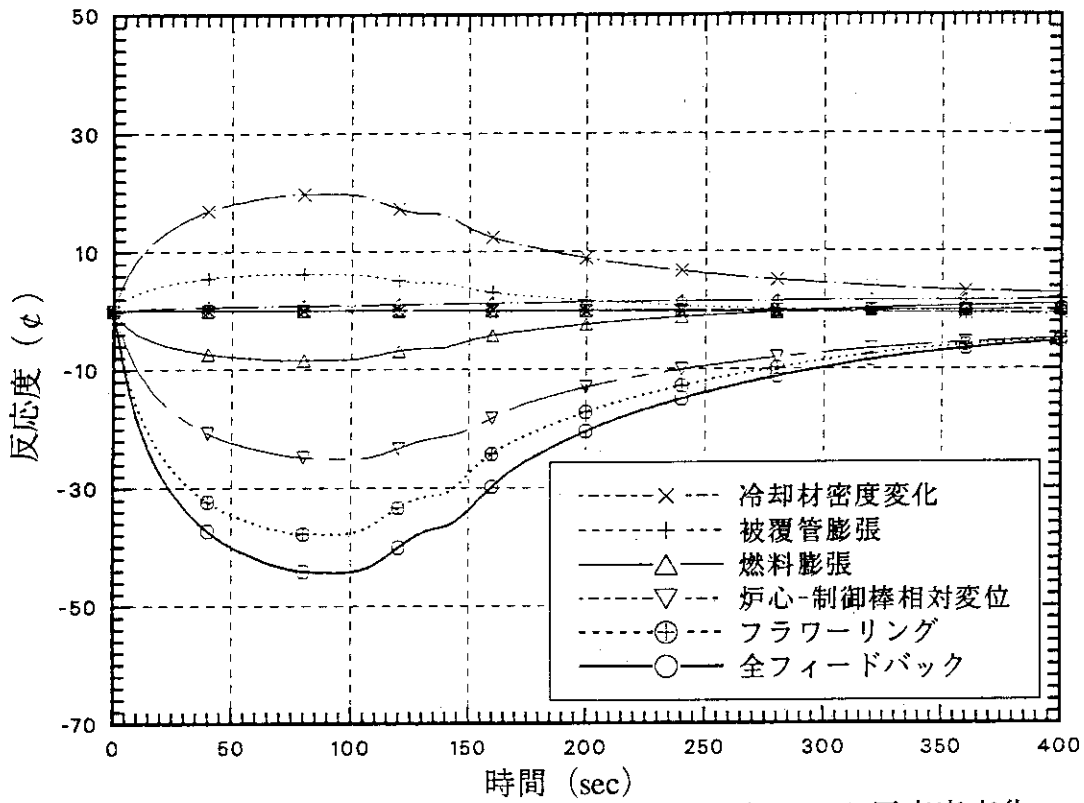


図 3.2.6 M-ABRのULOFにおけるフィードバック反応度変化

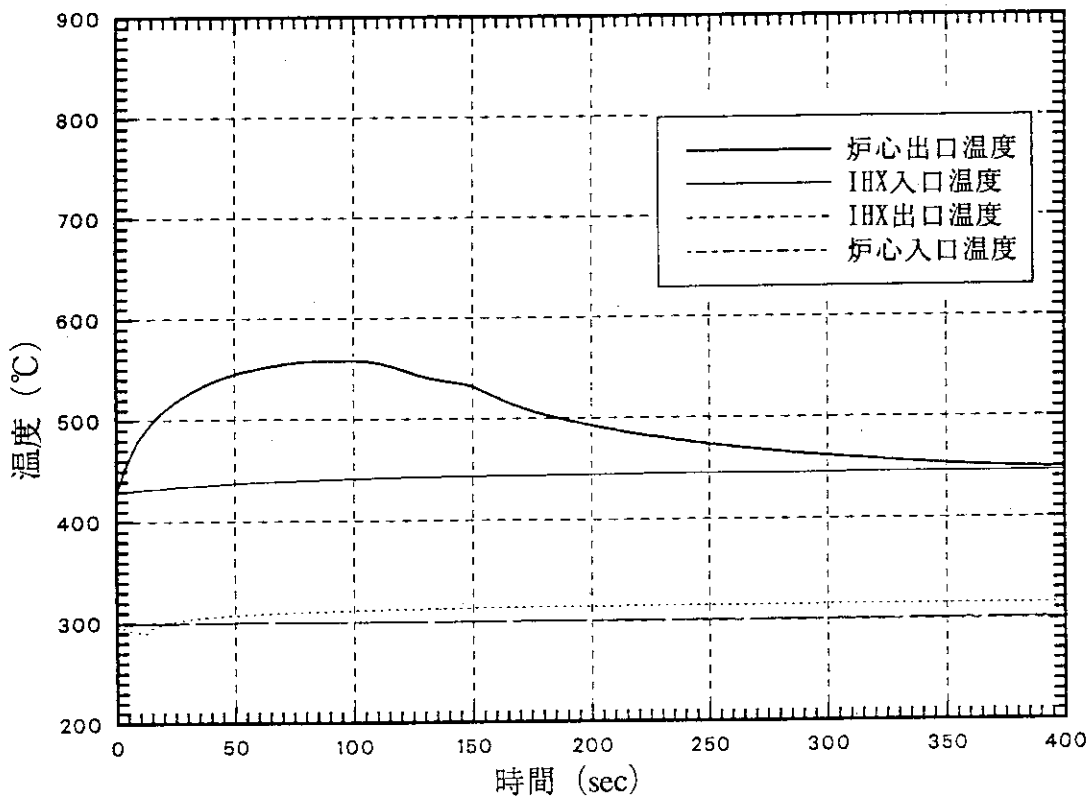


図 3.2.7 M-ABRのULOFにおける各部の温度変化

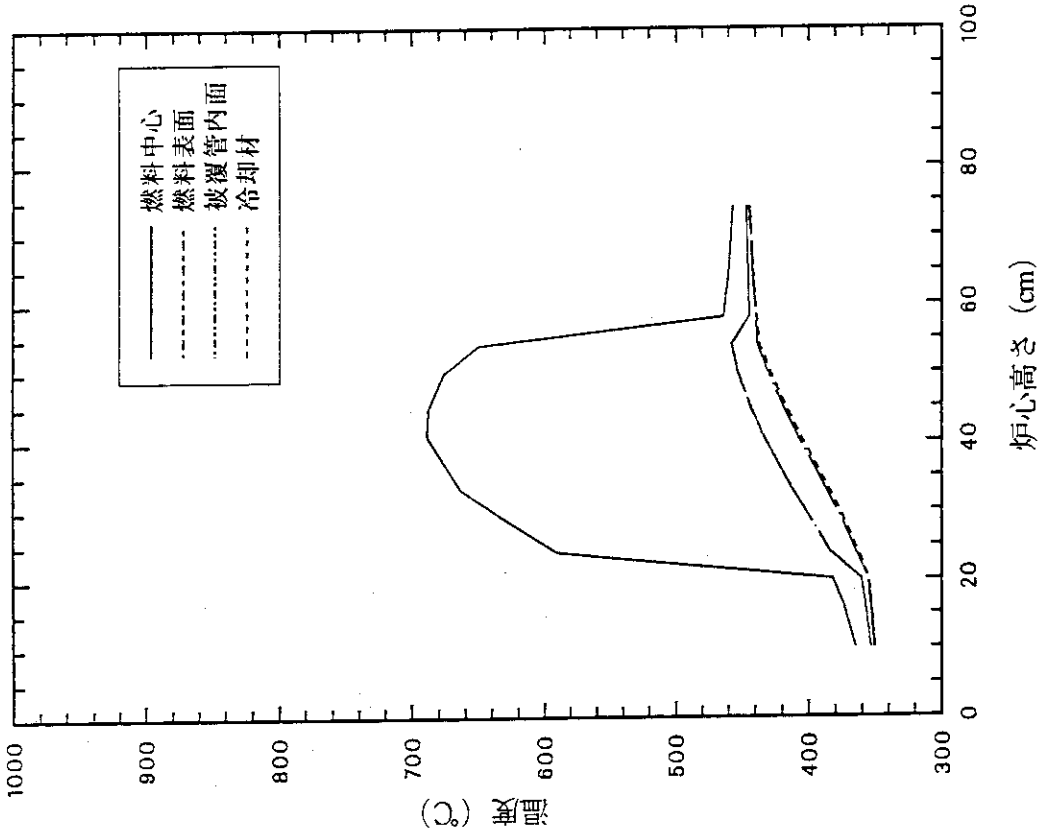


図 3.2.9 M-ABRのUTOP事象発生400秒後の軸方向温度分布
(平均チャンネル)

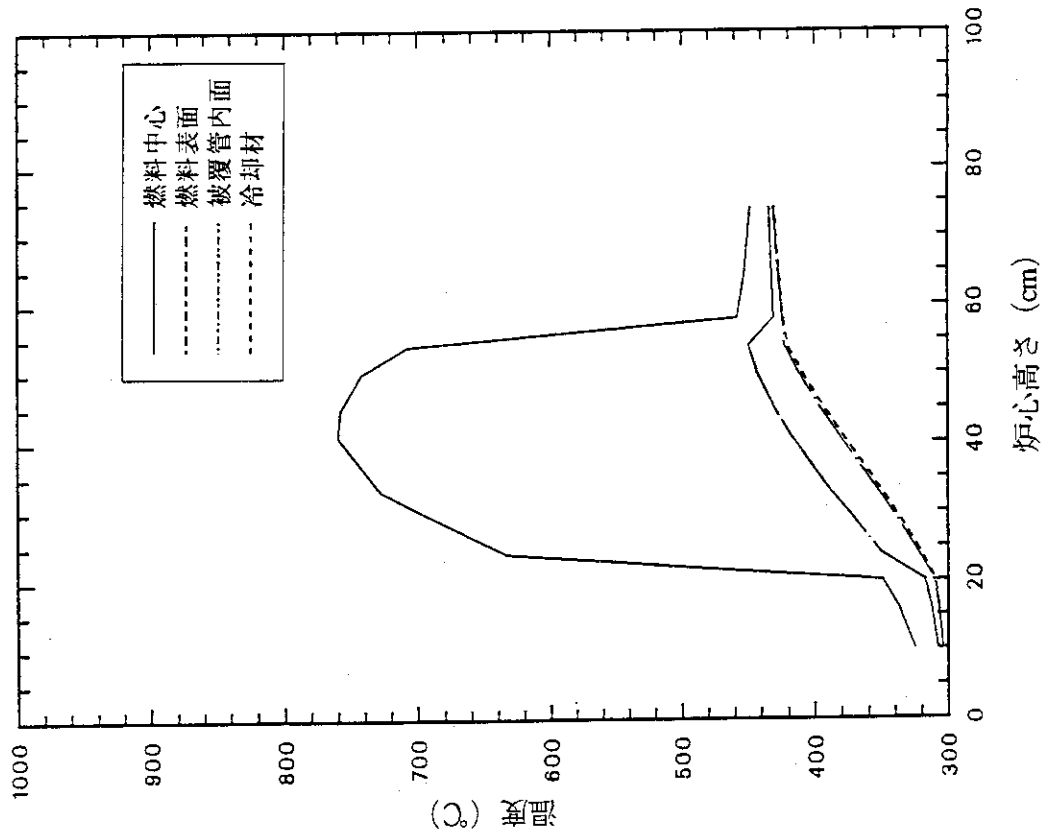


図 3.2.8 M-ABRのUTOP事象発生前の軸方向温度分布
(平均チャンネル)

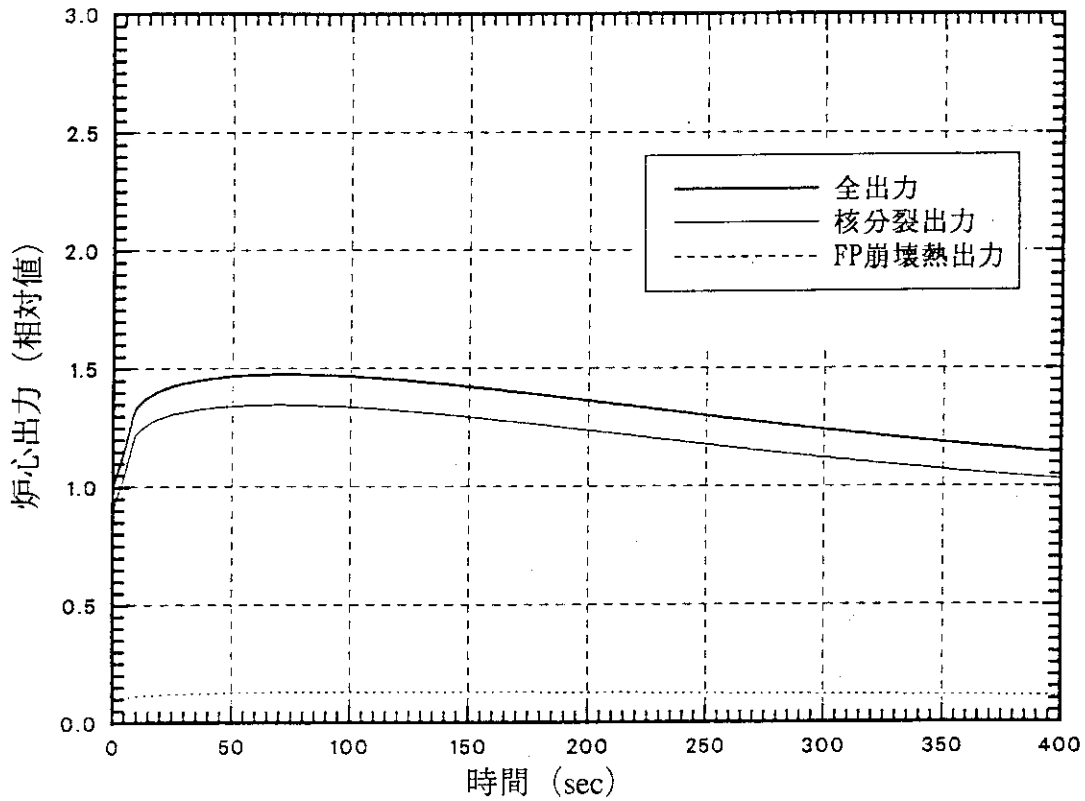


図 3.2.10 M-ABRのUTOPにおける炉心出力変化

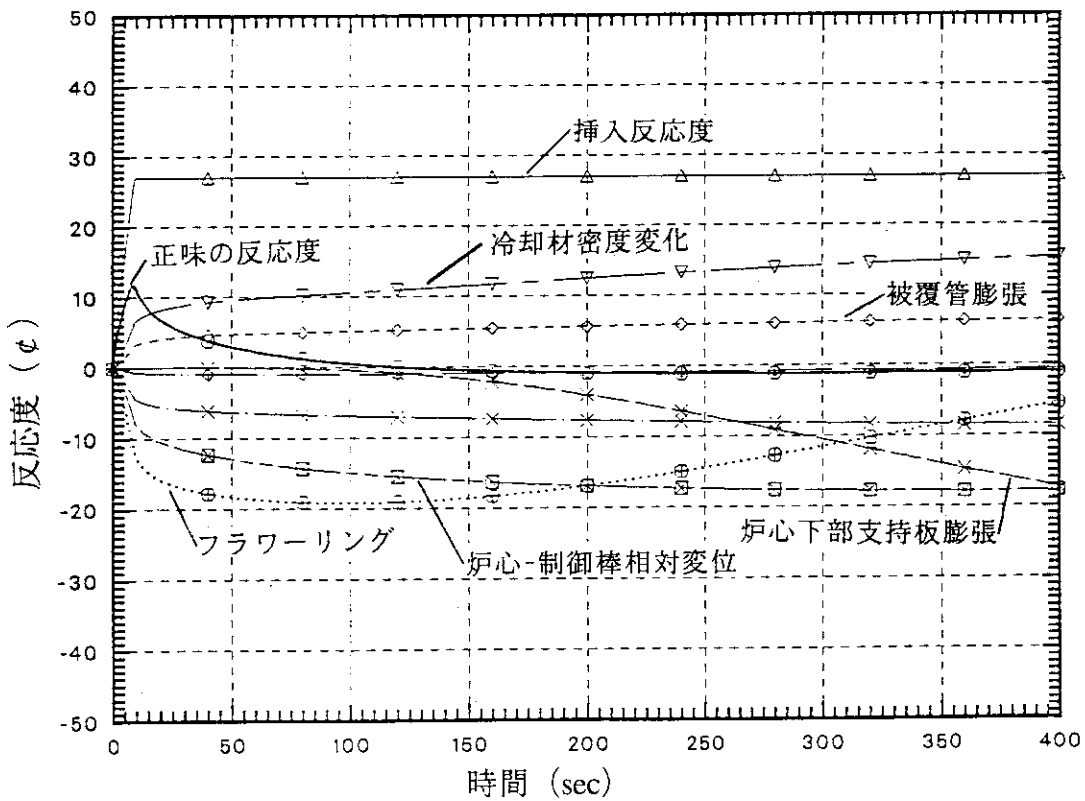


図 3.2.11 M-ABRのUTOPにおけるフィードバック反応度の時間変化

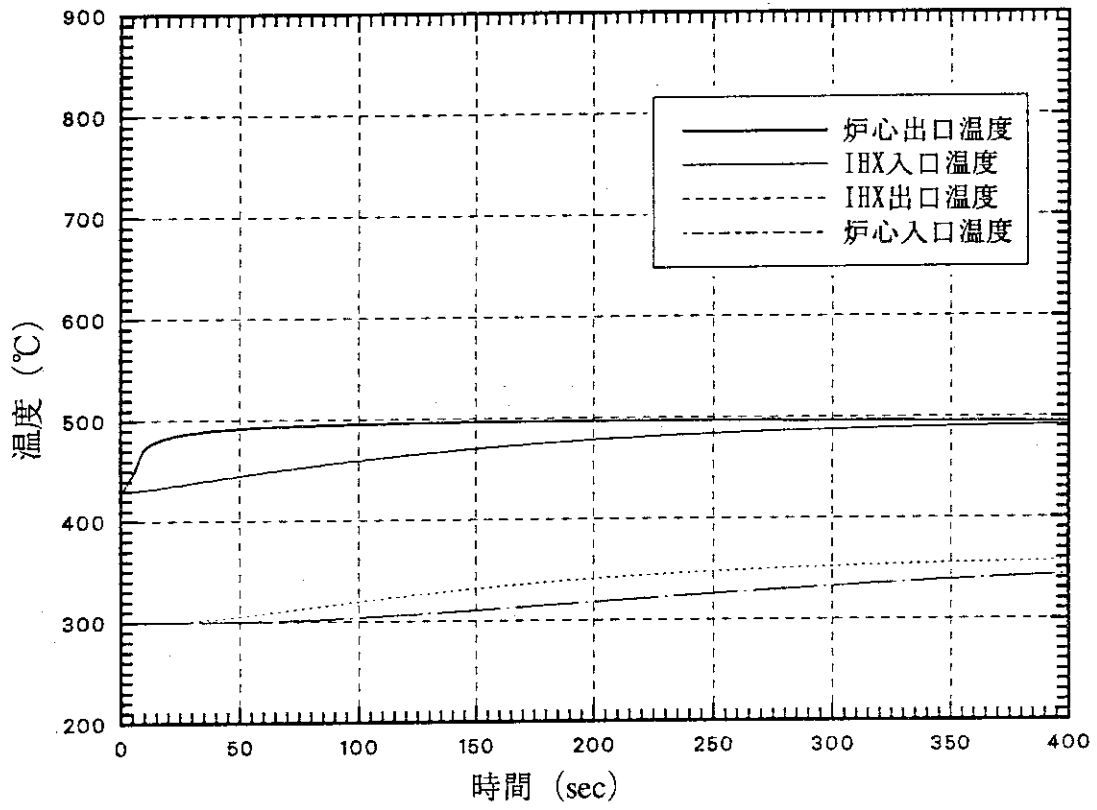


図 3.2.12 M-ABRのUTOPにおける各部の温度変化

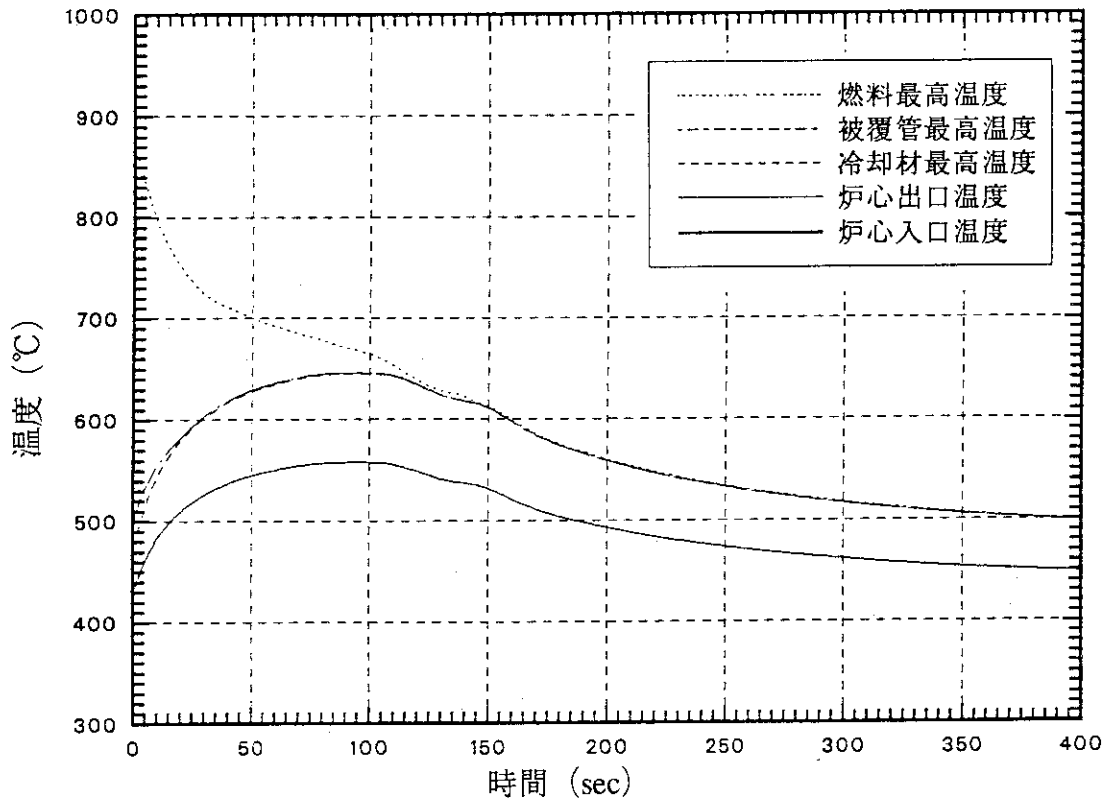


図 3.3.1 M-ABRのULOFにおける最高温度変化
(ホットチャンネル)

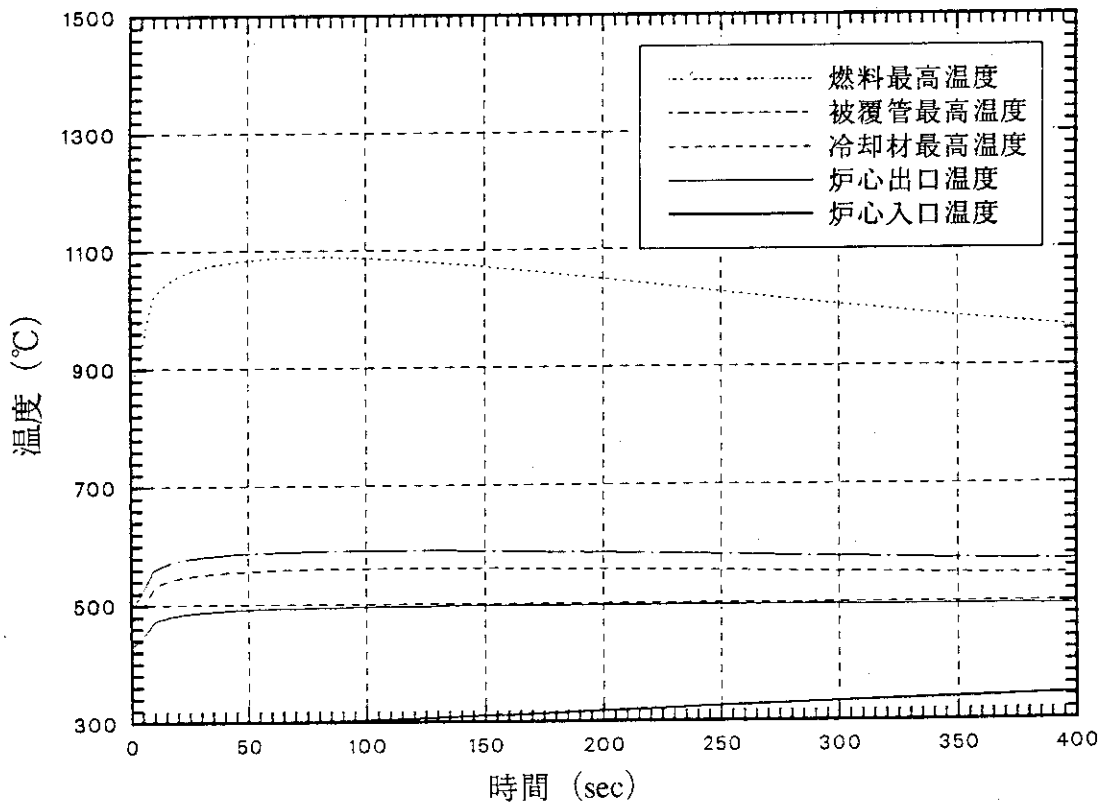


図 3.3.2 M-ABRのUTOPにおける最高温度変化
(ホットチャンネル)

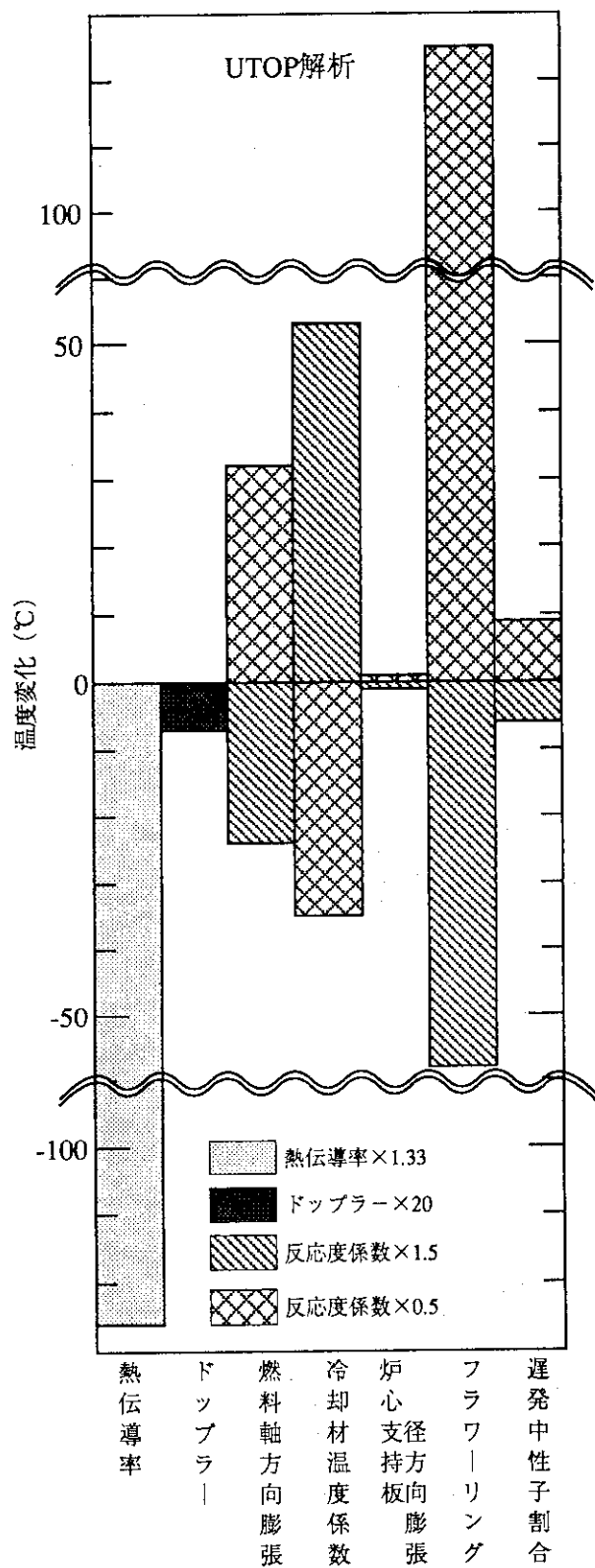


図 3.3.3 熱伝導率または反応度係数が変化した場合の燃料最高温度への影響

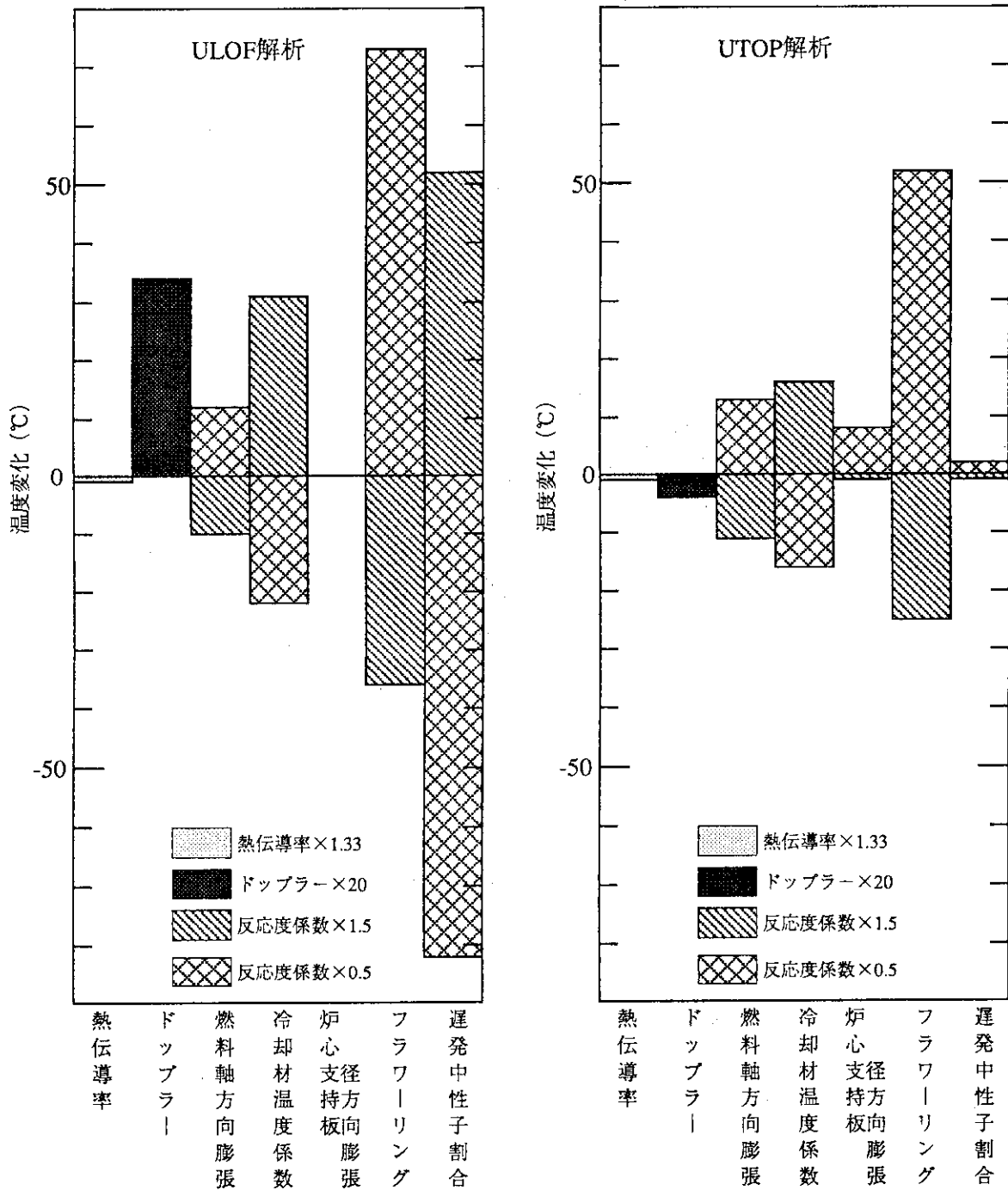


図 3.3.4 熱伝導率または反応度係数が変化した場合の被覆管最高温度への影響

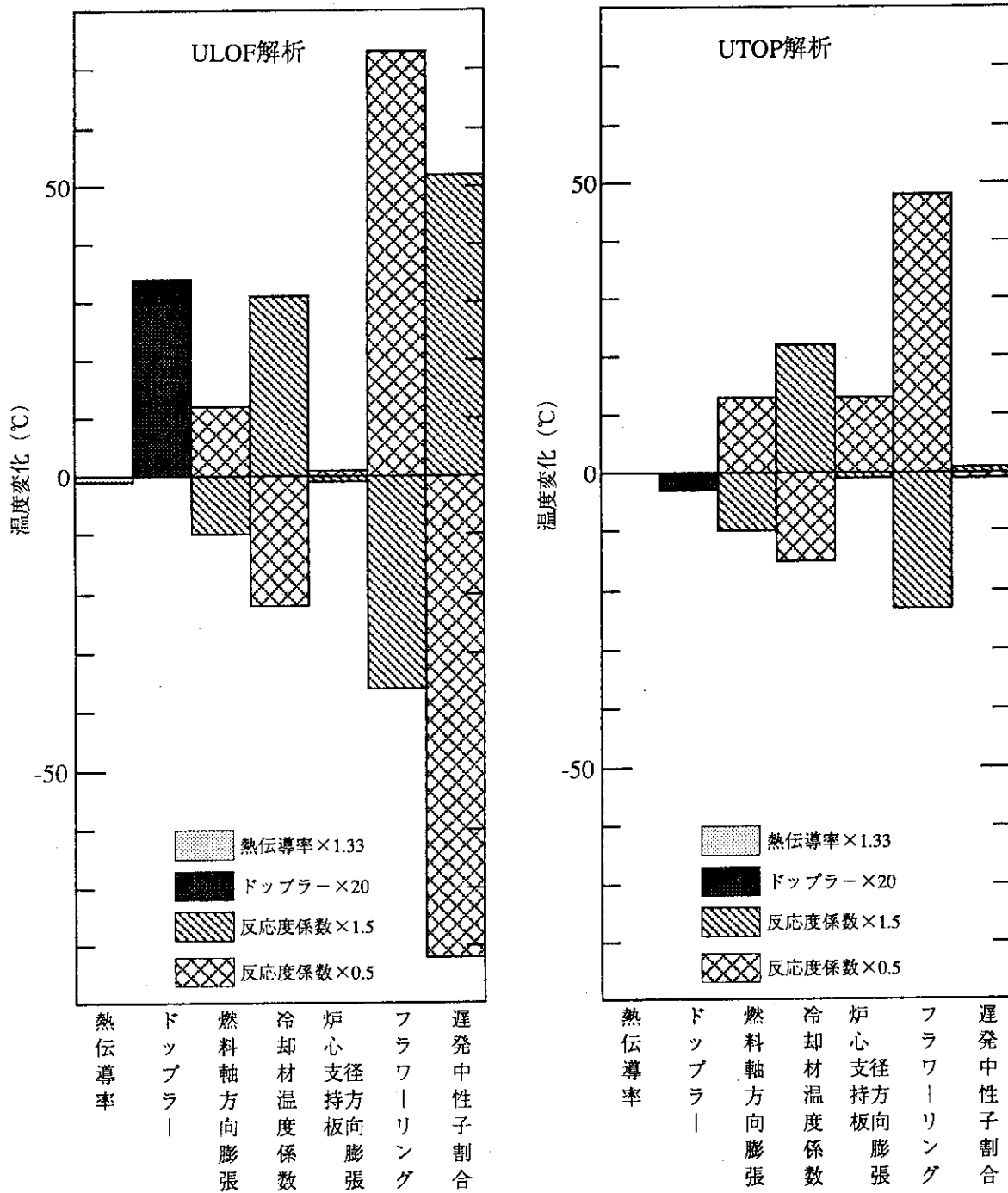


図 3.3.5 熱伝導率または反応度係数が変化した場合の冷却材最高温度への影響

4. ま と め

Na冷却金属燃料専焼炉（M-A B R）の過渡特性解析を実施して、安全性の観点から設計検討に資するため、Na冷却酸化物燃料高速炉用炉心過渡挙動解析コード「EXCURS」を金属燃料高速炉に適用できるように改造を行なった。改造は、

- ① 炉心から出た冷却材が I H X を通って炉心入口に循環する経路の追加、
- ② C R D L、フラワリング等の反応度フィードバック係数の追加、
- ③ 核分裂生成物の崩壊熱計算式の導入、
- ④ 金属燃料高速炉用の物性値の温度依存性および熱伝達式の取り込み、

である。

改造の妥当性を確認するために、ANLで行ったEBR-IIでのULOFおよびULOH S解析結果や電中研で行った1000MWe級金属燃料高速炉のUTOPおよびULOH S解析結果と「EXCURS」の解析結果と比較した。その結果、EBR-II炉心特有の炉構造を「EXCURS」に取り込むためのモデル化に難点があるものの、全般には「EXCURS」の解析結果と他の解析結果は良い一致を示した。したがって、本コードが、金属燃料高速炉の過渡特性解析に使用できることが確認できた。

改造「EXCURS」を用いて、現設計段階のM-A B RのULOFおよびUTOP解析を実施した。さらに、MA燃料の物性値及び解析上の不確かさがATWS解析結果に与える影響について、パラメータサーベイを実施した。その結果、フラワリング係数、遅発中性子割合、燃料熱伝導率が燃料最高温度に強く影響し、炉心支持板温度係数の解析結果への影響は小さいことが分かった。また、燃料熱伝達率の相違から金属燃料高速炉とM-A B Rのドブプラー係数による反応度フィードバックの傾向が異なることが分かった。

本改造は、炉心設計における安全性検討に資することを目的としたが、今後より詳細な過渡特性解析を本EXCURSEを用いて行うには、冷却材循環経路における配管（1次系および2次系を含む）での熱の移動の評価の他に、以下の検討が必要であろう：

- ① 炉心部の多元チャンネル化、
（径方向分布に関する反応度効果の評価）
- ② 1次冷却材流量変化の「EXCURS」内での評価、
（ポンプの動特性計算と冷却材の自然循環量から評価）
- ③ I H X 2次側流量変化のモデル化、
- ④ ホットプール、コールドプールでの冷却材流動解析の詳細化、
（プールの実効体積の流量依存性の考慮）
- ⑤ 適正なモデル化によるC R D L温度評価。

謝 辞

「EXCURS」の改造作業において、新型炉検討チーム 刑部真弘氏（現 東京商船大学）と（株）アイ・エス・エル 前田章雄氏に協力を頂きました。改造作業の熱流動方程式の導入に当り群分離消滅処理研究計画特別チーム 滝塚貴和氏に協力して頂きました。また、1000MWe級金属燃料高速炉の解析をするに当たり、電力中央研究所の西村友宏氏と横尾健氏に貴重な解析データと有益な助言を頂きました。最後に、本作業実施に当たり、高速炉物理研究室 中野正文室長には貴重なるご意見と種々の激励を頂きました。これらの方々に、心から謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 向山 武彦 他：“TRU消滅処理炉の設計研究 -TRU消滅処理の効率化をめざして-”，新型炉の設計研究 最終報告書 第4編，（原研），（1989）。
- 2) Saito S.：“EXCURS”，JAERI-M 7280，（1977）。
- 3) Fistedis S.H. (Ed.): Nucl. Eng. Des., 101, No.1 (1987)。
- 4) 横尾 健 他：“金属燃料FBRの固有の安全性に関する調査 -EBR-IIにおける安全性特性試験結果の検討-”，電力中央研究所報告，調査報告:T87028 (1988)。
- 5) 横尾 健 他：“金属燃料高速増殖炉の設計検討 -経済性，安全性を追究した炉心の設計-”，電力中央研究所報告，研究報告:T88043 (1989)。
- 6) Groff A.G.：“ORIGEN-2:A Revised and Updated Version of Oak Ridge Isotope Generation and Development Code”，ORNL-5621 (1980)。
- 7) Herzog J.P. et al.：“Code Validation with EBR-II Test Data”，ANL/CP-71328 (1991)。
- 8) Mohr D. et al.：“Validation of the HOTCHAN Code for Analyzing the EBR-II Core Following an Unprotected Loss of Flow”，Trans. Am. Nucl. Soc., 57, (1988) 318-319。
- 9) 西村 友宏（電中研）：（私信）
- 10) 高野 秀機 他：“TRU専焼炉の核特性解析（TRU消滅処理炉設計研究-II）”，JAERI-M 89-072 (1989)。
- 11) 滝塚 貴和 他：“TRU消滅処理炉の熱流動の検討（TRU消滅処理炉の設計研究(3)）”，JAERI-M 89-091 (1989)。
- 12) 小川 徹 他：“TRU消滅処理炉用燃料ならびに燃料サイクルの成立性に関する検討（TRU消滅処理炉の設計研究(IV)）”，JAERI-M 89-123 (1989)。
- 13) Mukaiyama, T. and Gunji, Y.：“Characteristics of actinide transmutation in minor actinide burner reactors and power reactors”，Proc. 1st OECD/NEA information exchange meeting on OMEGA program at Mito (1990)。

謝 辞

「EXCURS」の改造作業において、新型炉検討チーム 刑部真弘氏（現 東京商船大学）と（株）アイ・エス・エル 前田章雄氏に協力を頂きました。改造作業の熱流動方程式の導入に当り群分離消滅処理研究計画特別チーム 滝塚貴和氏に協力して頂きました。また、1000MWe級金属燃料高速炉の解析をするに当たり、電力中央研究所の西村友宏氏と横尾健氏に貴重な解析データと有益な助言を頂きました。最後に、本作業実施に当たり、高速炉物理研究室 中野正文室長には貴重なるご意見と種々の激励を頂きました。これらの方々に、心から謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 向山 武彦 他：“TRU消滅処理炉の設計研究 -TRU消滅処理の効率化をめざして-”，新型炉の設計研究 最終報告書 第4編，（原研），（1989）。
- 2) Saito S.：“EXCURS”，JAERI-M 7280，（1977）。
- 3) Pistedis S.H. (Ed.): Nucl. Eng. Des., 101, No.1 (1987).
- 4) 横尾 健 他：“金属燃料FBRの固有の安全性に関する調査 -EBR-IIにおける安全性特性試験結果の検討-”，電力中央研究所報告，調査報告:T87028（1988）。
- 5) 横尾 健 他：“金属燃料高速増殖炉の設計検討 -経済性，安全性を追究した炉心の設計-”，電力中央研究所報告，研究報告:T88043（1989）。
- 6) Groff A.G.：“ORIGEN-2:A Revised and Updated Version of Oak Ridge Isotope Generation and Development Code”，ORNL-5621（1980）。
- 7) Herzog J.P. et al.：“Code Validation with EBR-II Test Data”，ANL/CP-71328（1991）。
- 8) Mohr D. et al.：“Validation of the HOTCHAN Code for Analyzing the EBR-II Core Following an Unprotected Loss of Flow”，Trans. Am. Nucl. Soc., 57,（1988）318-319.
- 9) 西村 友宏（電中研）：（私信）
- 10) 高野 秀機 他：“TRU専焼炉の核特性解析（TRU消滅処理炉設計研究-II）”，JAERI-M 89-072（1989）。
- 11) 滝塚 貴和 他：“TRU消滅処理炉の熱流動の検討（TRU消滅処理炉の設計研究(3)）”，JAERI-M 89-091（1989）。
- 12) 小川 徹 他：“TRU消滅処理炉用燃料ならびに燃料サイクルの成立性に関する検討（TRU消滅処理炉の設計研究(IV)）”，JAERI-M 89-123（1989）。
- 13) Mukaiyama, T. and Gunji, Y.：“Characteristics of actinide transmutation in minor actinide burner reactors and power reactors”，Proc. 1st OECD/NEA information exchange meeting on OMEGA program at Mito（1990）。

付録 改造「EXCURS」のマニュアル

「EXCURS」の実行用JCL（富士通の大型計算機M-780、OSはOS-IV）及び改造「EXCURSE」の入力データを次に示す。

```

「EXCURS」用の実行用JCL
T(07) C(02) I(04) W(04) GRP
// EXEC FORT77, SO='J2003.EXCURS', Q=' .FORT77', A='ELM(*)'
// EXEC LKEDIT77, LM='J9100.EXCURSM2'
// EXEC GO
//*EXCURSM2 EXEC LMGO, LM='J9100.EXCURSM2'
//FT06F001 DD SYSOUT=*, DCB=(LRECL=137, BLKSIZE=137, RECFM=FBA)
// EXPAND GRNLP, SYSOUT=K
//FT01F001 DD DSN=&&FT01, UNIT=V10, SPACE=(TRK, (200, 100))
//FT08F001 DD DSN=&&FT08, UNIT=V10, SPACE=(TRK, (200, 100))
//FT09F001 DD DSN=&&FT09, UNIT=V10, SPACE=(TRK, (200, 100))
//FT50F001 DD DSN=J2003.EXCURSM1.LARGE.TEXT, DISP=SHR, LABEL=(, , IN)
//*FT50F001 DD DSN=J2003.EXCURSM1.TEXT, DISP=SHR, LABEL=(, , IN)
//FT21F001 DD DSN=J2003.MTLFBR.UTOPOT.DATA, DISP=OLD
//SYSIN DD DSN=J2003.MTLFBR.EXCURS.DATA(MYUTOP01), DISP=SHR, LABEL=(, , IN)
++
//

```

・改造「EXCURS」の入力データ

- #-1) MTLFLG (12) 金属燃料選択オプション
 ≤ 0 酸化物燃料
 > 0 金属燃料
|MTLFLG| > 10 のとき、入力説明の項を無視する。
- #-2) NCASE (12) 1回のジョブでの計算ケースの数
- #-3) TITL (A72) タイトルカード
- #-4) L1, L2, L3, L4 (4I10)
L1: Record #-5) の開始データ番号
L2: Record #-5) の終了データ番号
L3: +1; 読み込みデータの継続
-1; 読み込みデータの終了
L4: 未使用
- #-5) (5E14.7)
(D(I), I=L1, L2)
: 変更データの入力。

#-4), #-5) は2つで1セットになる。すなわち、 #-4)カードで #-5)カードの入力データ番号の始まりと終わりを定義し、 #-5)カードで実際の入力データを与える。この #-4)および #-5)カードは、オーバーレイが可能である。なお、 #-4)カードの第一カラムが '*' の場合、その行はコメント行を意味する。D(I)の内容について、以下の一覧表に示す。

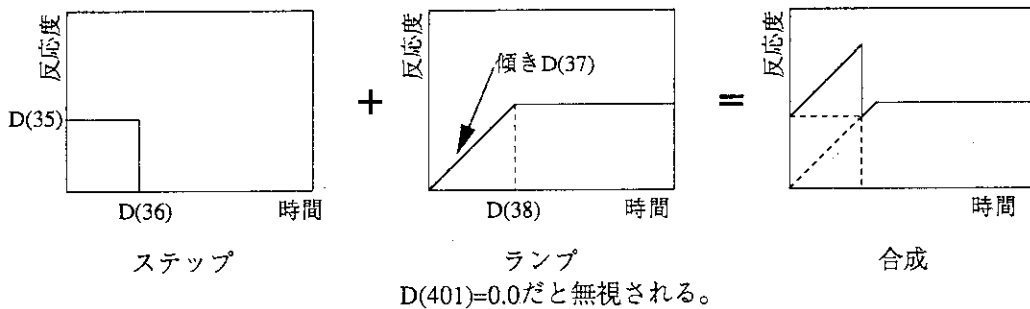
入力データ 一覧表

番号	内容	単位
1	過渡事象解析時間間隔設定オプション 0.0 : 自動設定 t(>0) : t秒時にD(14)データに変更 (D(14)>0の時) 自動設定 (D(14)=0.0の時) -M(<0) : Mキント計算後に自動設定にする	
2	ベリット (初期推定値) の逆数	1/sec
3	時間間隔 (初期推定値) (文献2)を参照)	sec
4	最小時間間隔 (文献2)を参照)	sec
5	最大時間間隔 (文献2)を参照)	sec
6	時間間隔の基準 (Q 値) の上限値 (文献2)を参照)	
7	時間間隔の基準 (Q 値) の下限値 (文献2)を参照)	
8	実効遅発中性子割合 (β_{eff})	
9	即発中性子寿命 (λ_0)	sec
10	中性子源	
11	平均ベリットの逆数 (文献2)を参照)	1/sec
12	反応度	
13	計算終了時間	
14	2番目の時間間隔, =0.0なら自動設定	sec
15	過渡事象発生直前の出力レベル	
16	過渡事象発生直前の遅発中性子先行核 (第1群) の濃度	
17	過渡事象発生直前の遅発中性子先行核 (第2群) の濃度	
18	過渡事象発生直前の遅発中性子先行核 (第3群) の濃度	
19	過渡事象発生直前の遅発中性子先行核 (第4群) の濃度	
20	過渡事象発生直前の遅発中性子先行核 (第5群) の濃度	
21	過渡事象発生直前の遅発中性子先行核 (第6群) の濃度	
22	遅発中性子 (第1群) の割合 (相対値)	
23	遅発中性子 (第2群) の割合 (相対値)	
24	遅発中性子 (第3群) の割合 (相対値)	
25	遅発中性子 (第4群) の割合 (相対値)	
26	遅発中性子 (第5群) の割合 (相対値)	
27	遅発中性子 (第6群) の割合 (相対値)	
28	遅発中性子 (第1群) の崩壊定数	1/sec
29	遅発中性子 (第2群) の崩壊定数	1/sec
30	遅発中性子 (第3群) の崩壊定数	1/sec
31	遅発中性子 (第4群) の崩壊定数	1/sec
32	遅発中性子 (第5群) の崩壊定数	1/sec
33	遅発中性子 (第6群) の崩壊定数	1/sec

入力データ 一覧表 (続き)

番号	内容	単位
34	1.0 (Fix)	
35	挿入反応度 (ステップ状反応度)	$\Delta k/k$
36	反応度挿入時間 (ステップ状反応度)	sec
37	挿入反応度 (ランプ状反応度)	$\Delta k/k/sec$
38	反応度挿入時間 (ランプ状反応度)	sec
39	スクラム・オプション (Yes/No=+1.0/-1.0)	

D(35)~D(38)までの関係図を以下に示す。



40	制御棒ワース	$\Delta k/k$
41	制御棒ストローク	cm
42	過渡事象発生前に挿入されている制御棒の長さ	cm
43	制御棒挿入加速度	cm/sec^2
41~43のデータはD(501)=1.0の時だけ。		
44	出力によるスクラム設定点	相対値
45	ベリオドスクラム設定点	sec
46	スクラムの遅れ時間	sec
47	ドブラー反応度係数	$T \Delta k / \Delta T$
48	燃料棒軸方向膨張温度係数 (>0: 被覆管の温度で評価, <0: 燃料部の温度で評価)	$\Delta k/k/^\circ C$
49	被覆管膨張温度係数	$\Delta k/k/^\circ C$
50	冷却材膨張温度係数	$\Delta k/k/^\circ C$
51	構造材膨張温度係数	$\Delta k/k/^\circ C$
52	冷却材流量インデックス (≥ 0.0 : ブロック化, < 0.0 : ブロック化しない)	
53	冷却材流量によるスクラム設定点	相対値
54	タイマーによるスクラム設定時間	sec
55	燃料ペレット (スラッグ) 半径	cm
56	被覆管内半径	cm
57	被覆管外半径	cm
58	冷却材等価半径	cm
59	構造材等価半径	cm
60	冷却材流路等価直径 (dc)	cm
$dc = 4 \cdot (\text{流路面積}) / (\text{流路面長さ}) \quad \text{で与える}$ $Pe = D(60) \cdot v \cdot \rho \cdot Cp / \lambda$		

入力データ 一覧表 (続き)

番号	内容	単位
D(61)~D(72)は、D(94)=1 (温度は物理量に依存) の場合、内部で計算される。		
61	燃料の熱伝導率 (<0: 内部計算値に D(61) を掛けた値) (D(94)=1の場合: $D(61)=5.04+0.0393*T-1.72 \times 10^{-5} * T^2$)	cal/cm ² ·°C·sec
62	燃料の密度 (<0: 内部計算値を D(62) に置換) (D(94)=1の場合: D(62)=15.8)	g/cm ³
63	燃料の比熱	cal/g·°C
64	被覆管の熱伝導率	cal/cm·°C·sec
65	被覆管の密度	g/cm ³
66	被覆管の比熱	cal/g·°C
67	冷却材の熱伝導率	cal/cm·°C·sec
68	冷却材の密度	g/cm ³
69	冷却材の比熱	cal/g·°C
70	構造材の熱伝導率	cal/cm·°C·sec
71	構造材の密度	g/cm ³
72	構造材の比熱	cal/g·°C
73	ギャップ・コンダクタンス	cal/cm·°C·sec
74	炉心の高さ	cm
75	反射体節約	cm
76 ~ 79	冷却材の流速 (時間の関数) 評価式の係数 D(601)=0.0の場合、有効 関数: $V(t)/V_0 = D(76) * \exp\{D(77)*t\} + D(78)*t + D(79)$	
80	平均チャンネルでの過渡事象発生前の冷却材速度	cm/sec
81	ホット・チャンネルでの過渡事象発生前の冷却材速度 関連入力: D(76)~D(79), D(601)~, D(952) (D(952)>0の時、更新)	cm/sec
82	平均チャンネルでの過渡事象発生前の出力密度	cal/cm ³ ·sec
83	ホット・チャンネルでの過渡事象発生前の出力密度	cal/cm ³ ·sec
84	軸方向メッシュ分割数 関連入力: D(226)~	最大19
85	燃料径方向メッシュ分割数 関連入力: D(201)~, D(921)~	最大13
86	冷却材炉心入口温度 関連入力: D(701)~	°C
87	燃料の融点	°C
88	熱伝導方程式の定数	
89	熱伝導方程式の定数	
90	熱伝導方程式の定数 関数: $Nu = D(88) + D(89) \times Pe^{D(90)}$	

入力データ 一覧表 (続き)

番号	内容	単位
91	印刷間隔 ((時間間隔)*D(91)) sec毎に出力する。	
92	反復計算の収束判定条件	
93	反復計算での印刷間隔	
94	物性値の温度依存性についての指標 (Yes/No=1/0), D(61)~D(72)参照。	
95	計算を行うチャンネル数(1~3)	
96	崩壊熱計算の時間間隔	sec
97	ファイルにデータを書き出す時間	min
98	出力分布の選択	
	軸方向 径方向	
	=0.0 余弦 平坦	
	=1.0 余弦 入力	
	=2.0 入力 入力	
	入力は、D(201)~D(250)	
99	熔融燃料の比熱	Cal/g°C
100	熔融燃料の潜熱	Cal/g
<p>データ番号101~150は、工学的ホットチャンネル係数に関する入力データである。 D(95)が 3.0 の場合にのみ、以下のデータが必要である。</p>		
101 ~ 105	寸法許容範囲 (冷却材領域、被覆管外径、被覆管内径、 燃料外表面、燃料)	
106 ~ 110	核分裂分布の非一様性 (冷却材領域、被覆管外径、被覆管内径、 燃料外表面、燃料)	
111 ~ 115	冷却材物性値の不確かさ (冷却材領域、被覆管外径、被覆管内径、 燃料外表面、燃料)	
116 ~ 120	被覆管物性値の不確かさ (冷却材領域、被覆管外径、被覆管内径、 燃料外表面、燃料)	
121 ~ 125	ギャップ・コンダクタンスの不確かさ (冷却材領域、被覆管外径、 被覆管内径、燃料外表面、燃料)	
126 ~ 130	燃料物性値の不確かさ (冷却材領域、被覆管外径、被覆管内径、 燃料外表面、燃料)	
131 ~ 135	炉心出力の不確かさ (冷却材領域、被覆管外径、被覆管内径、 燃料外表面、燃料)	

入力データ 一覧表 (続き)

番号	内容	単位
136 ～ 140	冷却材流量の不確かさ (冷却材領域、被覆管外径、被覆管内径、 燃料外表面、燃料)	
141 ～ 145	境膜係数の不確かさ (冷却材領域、被覆管外径、被覆管内径、 燃料外表面、燃料)	
146 ～ 150	その他の因子 (冷却材領域、被覆管外径、被覆管内径、 燃料外表面、燃料)	
<p>データ番号151～192は温度依存の物性値である。 D(94)=0.0の場合、これらのデータを必要としない。 ここで、温度依存の物性値 (k(T), ρ(T), Cp(T), h(T)) は、以下の2次関数フィッティングにより求める。</p> $k(T), \rho(T), Cp(T), h(T) = D(I) + D(I+1) * T + D(I+2) * T^2$		
151～153	燃料の熱伝導率	
154～156	被覆管の熱伝導率	
157～159	冷却材の熱伝導率	
160～162	構造材の熱伝導率	
163～165	燃料の密度	
166～168	被覆管の密度	
169～171	冷却材の密度	
172～174	構造材の密度	
175～177	燃料の比熱	
178～180	被覆管の比熱	
181～183	冷却材の比熱	
184～186	構造材の比熱	
187～189	平均チャンネルのギャップコンダクタンス	
190～192	ホットチャンネルのギャップコンダクタンス	
193	燃料熔融温度の幅	°C
194	熔融した燃料の熱伝導率	cal/cm·°C·sec
195～198	未使用	
199	通常：0.0, それ以外の時、サブルーチンMDRODのチェック。	
200	通常：0.0, それ以外の時、物性値はD(61)～の値を用いる。	

入力データ 一覧表 (続き)

番号	内容	単位
<p>データ番号201~250は、出力分布の入力である。 D(98)=0.0の場合、これらの入力は不要である。 D(98)=1.0の場合、径方向出力分布の入力のみを必要とする。 なお、メッシュ点距離の入力はD(921)からになる。</p>		
201~201+D(85)	燃料径方向出力分布 (相対値) (データ数: (D(85)+1)個)	
226~226+D(84)	軸方向出力分布 (相対値) (データ数: (D(84)+1)個)	
<p>データ番号251~280は、プロッター用の入力データである。プロットをしない場合は、不要である。</p>		
251	プロッター・オプション (する/しない) = (1.0/0.0)	
252	時間軸の長さ	cm
253	時間軸目盛りの最大値 (≤ 0.0 : 自動設定)	sec
254	出力軸の長さ	cm
255	出力軸目盛りの最大値 (≤ 0.0 : 自動設定)	相対値
256	積算出力軸の長さ	cm
257	積算出力軸目盛りの最大値 (≤ 0.0 : 自動設定)	相対値
258	反応度軸の長さ	cm
259	反応度軸目盛りの最小値	$\Delta k/k$
260	反応度軸目盛りの最大値 (≤ 0.0 : 自動設定)	$\Delta k/k$
261	ベリト軸の長さ	cm
262	ベリト軸目盛りの最小値	sec
263	ベリト軸目盛りの最大値 (≤ 0.0 : 自動設定)	sec
264	燃料温度軸の長さ	cm
265	燃料温度軸目盛りの最小値	$^{\circ}\text{C}$
266	燃料温度軸目盛りの最大値 (≤ 0.0 : 自動設定)	$^{\circ}\text{C}$
267	被覆管および冷却材温度軸の長さ	cm
268	被覆管および冷却材温度軸目盛りの最小値	$^{\circ}\text{C}$
269	被覆管および冷却材温度軸目盛りの最大値 (≤ 0.0 : 自動設定)	$^{\circ}\text{C}$
270	冷却材速度軸の長さ	cm
271	冷却材速度軸目盛りの最小値	cm/sec
272	冷却材速度軸目盛りの最大値 (≤ 0.0 : 自動設定)	cm/sec
273	温度分布プロット・オプション	
274	状態プロット・オプション	
275	ファンネルプロット・オプション	
276	軸方向軸の長さ	cm
277	径方向軸の長さ	cm
278	温度軸の長さ	cm
279	温度軸目盛りの最小値	$^{\circ}\text{C}$
280	温度軸目盛りの最大値 (≤ 0.0 : 自動設定)	$^{\circ}\text{C}$
281	プロット間隔	sec
282~300	未使用	

入力データ 一覧表 (続き)

番号	内容	単位
データ番号301~400は、崩壊熱計算用の入力データである。		
301	崩壊熱計算オプション 0/1/10=(計算しない)/(時間依存のテーブル使用)/(内部計算式を使う)	
D(301)=1の場合:		
302	テーブル中の崩壊熱データの個数	
303	崩壊熱データ (時間(sec))	
$\widetilde{303+D(302)-1}$		
303+D(302)	崩壊熱データ (全出力に対する崩壊熱の割合(相対値))	
$\widetilde{303+2D(302)-1}$		
D(301)=10の場合:		
302	過渡事象発生前の崩壊熱の全出力に対する割合 (通常0.065~0.07、残り0.93~0.935は核分裂出力である。)	
303	崩壊熱計算時の核分裂生成物の群数	
304	第i群核分裂生成物による崩壊熱への寄与率 (寄与率合計は1.0)	
$\widetilde{304+D(303)-1}$		
304+D(303)	第i群核分裂生成物の崩壊定数(=ln2/T _{1/2}) (1/sec)	
$\widetilde{304+2D(303)-1}$		
データ番号401~450は、外部からの挿入反応度の計算オプションである。 D(401)が1.0または2.0の場合、(時間-反応度)のカーブを計算して用いる。		
401	外部挿入反応度計算オプション =1.0 テーブル使用 =2.0 スクラムまでD(35)~D(38)。スクラム後、スクラム時のDEXT*(1.0-テーブル値)	
402	入力テーブルの数	
403~402+D(402)	スクラム後の時間	sec
403+D(402)~402+2·D(402)	反応度のデータ	relative
データ番号500~600は、スクラム計算用のデータである。 D(501)が1.0の場合、(時間-スクラム)のカーブを計算して用いる。		
501	外部挿入反応度計算オプション =1.0 テーブル値使用。 ≠1.0 D(40)~D(43)を使用。	
502	入力テーブルの数	
503~502+D(502)	時間・(スクラム後)	sec
503+D(502)~502+2·D(502)	反応度のデータ	relative

入力データ 一覧表 (続き)

番号	内容	単位
データ番号601~699は、流量の低下に関する計算の入力データである。		
601	計算オプション	
=0	$V(t)/V_0=D(76)*\exp\{D(77)*t\}+D(79)$ により求める。	
=1	テーブルによる内挿	
=2	$V(t)=\max\{(\text{テーブル内挿値})\cdot\{D(699)\cdot(\text{出力})+D(698)\}/(\text{時間}), \text{内挿値}\}$	
=3		
602	流量の低下に関する入力データの個数	
603	流量の低下に関する入力データ (時間)	sec
603+D(602)		
603+D(602)	流量の低下に関する入力データ (流量)	relative
602+2·D(602)		
698	局部的出力に対する入口速度	
699		
データ番号701~799は、冷却材入口温度に関する計算の入力データである。		
701	入口温度変化用のテーブル・オプション	
=0.0	入口温度変化無し	
=1.0	時間の関数	
=2.0	出力の関数	
702	入力データの個数	
703	時間もしくは出力	sec/relative
703+D(702)		
703+D(702)	温度データ	relative
702+2·D(702)		
データ番号801~920は、燃料構造に関する入力データである。		
801~800+D(84)	燃焼した燃料の ボイド領域 の半径 (平均チャンネル)	
821~820+D(84)	燃焼した燃料の 柱状粒界領域 の半径 (平均チャンネル)	
841~840+D(84)	燃焼した燃料の クサビ状粒界領域 の半径 (平均チャンネル)	
861~860+D(84)	燃焼した燃料の ボイド領域 の半径 (ネット・チャンネル)	
881~880+D(84)	燃焼した燃料の 柱状粒界領域 の半径 (ネット・チャンネル)	
901~900+D(84)	燃焼した燃料の クサビ状粒界領域 の半径 (ネット・チャンネル)	
データ番号921~922は、燃料ピンの熱計算でのメッシュに関する入力データである。		
921	炉心部のメッシュポイント (下部) i. e. MBR1	
922	炉心部のメッシュポイント (上部) i. e. MBR2	
931~930+D(84)	計算メッシュ点。(ピンの下部からの長さ)	cm

入力データ 一覧表 (続き)

番号	内容	単位
データ番号951~960は、計算オプションに関する入力データである。		
951	フィードバックオプション =0.0; 径方向:平均チャンネル 軸方向:ピン全領域 (2~JMAX) =1.0; 径方向:平均チャンネル 軸方向:燃料領域 (MBR1~MBR2) =2.0; 径方向:全チャンネル 軸方向:ピン全領域 (2~JMAX) 金属燃料時のNaキック反応度は計算しない。	
952	温度オプションのクラディング温度 ネットチャンネル温度が入力値となるように初期流速を変化させるオプションである。	
953	出力レベル (通常は1.0)	relative
954	ポンプの低スピードによるスクラム (オプションID:>0 スクラム判定)	
955	ポンプのスピードの定数部	
956	ポンプのスピードの比例部	
957	ポンプのスピードの遅延時間	
958	Implicitness factor OMEGA	
959	Scram option	
960	Multiplication option >0.0;yes	
データ番号961~1011は、工学的ホットチャンネル係数(Multiplication Term) 計算オプションに関する入力データである。 D(95)=3.0またはD(960)=0.0の場合、不要である。		
961 ~ 965	寸法許容範囲 (冷却材領域、被覆管外径、被覆管内径、 燃料外表面、燃料)	
966 ~ 970	核分裂分布の非一様性 (冷却材領域、被覆管外径、被覆管内径、 燃料外表面、燃料)	
971 ~ 975	冷却材物性値の不確かさ (冷却材領域、被覆管外径、被覆管内径、 燃料外表面、燃料)	
976 ~ 980	被覆管物性値の不確かさ (冷却材領域、被覆管外径、被覆管内径、 燃料外表面、燃料)	
981 ~ 985	ギャップ・コンダクタンスの不確かさ (冷却材領域、被覆管外径、 被覆管内径、燃料外表面、燃料)	
986 ~ 990	燃料物性値の不確かさ (冷却材領域、被覆管外径、被覆管内径、 燃料外表面、燃料)	

入力データ 一覧表 (続き)

番号	内容	単位
991 ~ 995	炉心出力の不確かさ (冷却材領域、被覆管外径、被覆管内径、 燃料外表面、燃料)	
996 ~ 1000	冷却材流量の不確かさ (冷却材領域、被覆管外径、被覆管内径、 燃料外表面、燃料)	
1001 ~ 1005	境界係数の不確かさ (冷却材領域、被覆管外径、被覆管内径、 燃料外表面、燃料)	
1006 ~ 1010	その他の因子 (冷却材領域、被覆管外径、被覆管内径、 燃料外表面、燃料)	
1011	詳細プリントオプション (>0.0: yes)	
データ番号1100~は、本改造によって追加した冷却材循環に関する入力データである。		
1012	温度分布出力オプション (>0.0:yes)	
1013	冷却材体積出力オプション (>0.0:yes)	
1100	炉心モデル <0 (炉心) → (ホットプール) → (IHX) → (コールドプール) → (炉心) >0 (炉心) → (配管) → (IHX) → (ホットプール) → (炉心) D(1100) =1 IHXの2次側入口温度、流量は一定。 =2 2次流量をD(1114)~で与える。 =3 2次流量変化は1次流量変化と同じにする。	
1101	IHX 1次流量	kg/sec
1102	IHX 1次入口温度	°C
1103	IHX 1次出口温度	°C
1104	IHX 2次流量	kg/sec
1105	IHX 2次入口温度	°C
1106	IHX 2次出口温度	°C
1110	ホットプール 定常状態の温度	°C
1111	ホットプール 定常状態の容積	m ³
1112	コールドプール 定常状態の温度	°C
1113	コールドプール 定常状態の容積	m ³
1114	2次流量変化のデータ数。(D(1100) =2の場合、必要)	
1115 ~ 1114+D(1114)	2次流量変化のデータ (時間)	
1115+D(1114) ~ 1115+2*D(1114)	2次流量変化のデータ (流量) (相対値)	

入力データ 一覧表 (続き)

番号	内容	単位
データ番号1200～1207は、本改造によって、追加した反応度係数の入力データである。		
1200	Na-Gap温度変化に伴う反応度係数	$\Delta k/k/^\circ\text{C}$
1201	CRDL温度変化に伴う反応度係数	$\Delta k/k/^\circ\text{C}$
1202	炉心支持板径方向膨張反応度係数	$\Delta k/k/^\circ\text{C}$
1203	炉心上部Na膨張温度係数	$\Delta k/k/^\circ\text{C}$
1204	炉心下部温度係数	$\Delta k/k/^\circ\text{C}$
1205	径方向反射体膨張温度係数	$\Delta k/k/^\circ\text{C}$
1206	径方向ブランケット膨張温度係数	$\Delta k/k/^\circ\text{C}$
1207	ダクト径方向膨張温度係数	$\Delta k/k/^\circ\text{C}$
1208	ダミー	
1209	ダミー	
1210	時系列データをファイルに出力する間隔。	
1211	炉心支持板の厚さ (=0の場合、支持板温度は炉心入口温度を用いる) cm	cm
1250	CRDL計算用 炉心下部冷却材領域の厚さ	cm
1251	CRDL計算用 炉心下部ブランケットの厚さ	cm
1252	CRDL計算用 炉心部高さ	cm
1253	CRDL計算用 炉心上部ブランケットの厚さ	cm
1254	CRDL計算用 炉心上部とホットプール部までの距離	cm
1255	CRDL計算用 ホットプール部の厚さ	cm
1301	ホットプールからIHXまでのパイプ (D(1100)>0の場合) または 配管 (D(1100)<0の場合) の長さ	m
1302	ホットプールからIHXまでのパイプ (D(1100)>0の場合) または 配管 (D(1100)<0の場合) の直径	m
1303	ホットプールからIHXまでのパイプ (D(1100)>0の場合) または 配管 (D(1100)<0の場合) のメッシュ数 (<1000)	
1304	プールから炉心までのパイプの長さ	m
1305	プールから炉心までのパイプの直径	m
1306	プールから炉心までのパイプのメッシュ数 (<1000)	
1315	径方向反射体の定常状態での入口温度	$^\circ\text{C}$
1316	径方向反射体の定常状態での出口温度	$^\circ\text{C}$
1317	径方向ブランケットの定常状態での入口温度	$^\circ\text{C}$
1318	径方向ブランケットの定常状態での出口温度	$^\circ\text{C}$