

JAERI-Tech

2004-048

JP0450518



HTTR制御棒引抜き試験の動特性解析
(受託調査)

2004年6月

高田 英治・中川 繁昭・高松 邦吉
島川 聰司・野尻 直喜・藤本 望

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、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。

入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、
お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division,
Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-
gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

HTTR 制御棒引抜き試験の動特性解析
(受託調査)

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉開発部
高田 英治※・中川 繁昭・高松 邦吉・島川 聰司・野尻 直喜・藤本 望

(2004年3月8日受理)

高温ガス炉の固有の安全性を定量的に実証するため、高温工学試験研究炉（High Temperature Engineering Test Reactor: HTTR）において、反応度投入及び炉心除熱量減少を試験として実機の原子炉で生じさせる安全性実証試験を実施している。安全性実証試験の1つである制御棒引抜き試験について、1点炉近似モデルにより試験時の動特性解析を実施した。実測値と解析値の比較から、1点炉近似モデルが試験の結果を再現できることを確認した。また、添加反応度、温度係数、物性値等の各パラメータについて、制御棒引抜き事象に対する原子炉動特性への感度を明らかにした。

本報告書は、文部科学省からの受託事業「高温ガス炉固有の安全性の定量的実証」の成果である。
大洗研究所：〒311-1394 茨城県東茨城郡大洗町成田町新堀 3607
※ 業務協力員

Core Dynamics Analysis of Control Rod Withdrawal Test in HTTR
(Contract Research)

Eiji TAKADA^{*}, Shigeaki NAKAGAWA
Kuniyoshi TAKAMATU, Satoshi SHIMAKAWA
Naoki NOJIRI and Nozomu FUJIMOTO

Department of HTTR Project
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received March 8, 2004)

The HTTR (High Temperature Engineering Test Reactor), which has thermal output of 30MW, coolant inlet temperature of 395°C and coolant outlet temperature of 850°C/950°C, is a first high temperature gas-cooled reactor (HTGR) in Japan. The HTGR has a high inherent safety potential to accident condition. Safety demonstration tests using the HTTR are underway in order to demonstrate such excellent inherent safety features of the HTGR. The reactivity insertion test demonstrates that rapid increase of reactor power by withdrawing the control rod is restrained by only the negative reactivity feedback effect without operating the reactor power control system, and the temperature transient of the reactor is slow. The best estimated analyses have been conducted to simulate reactor transients during the reactivity insertion test. A one-point core dynamics approximation with one fuel channel model is applied to this analysis. It was found that the analytical model for core dynamics could simulate the reactor power behavior. It was found how sensitive to the analytical result were the parameters such as inserted reactivity, reactivity feedback effect of fuel and moderator (graphite) temperature, heat capacity and thermal conductivity of core graphite component, and so on. It is crucial to evaluate these parameters precisely to simulate a performance of HTGR with showing excellent inherent safety features under accident condition.

Keywords : Safety Demonstration Test, Inherent Safety, Reactivity Insertion,
Accident Simulation, Safety Design, Safety Evaluation, HTGR, HTR, HTTR

Present Study is entrusted from Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology of Japan.

^{*} Cooperative Staff

目 次

1. はじめに	1
2. HTTR の設備概要	3
3. 制御棒引抜き試験の概要	9
4. 動特性解析	15
5. 感度解析	23
6. 解析コードの改良方針	32
7. まとめ	35
謝 辞	35
参考文献	35
付 錄 全試験ケースの解析条件と解析結果	37

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of HTTR	3
3. Outline of Control Rod Withdrawal Test	9
4. Core Dynamics Analysis	15
5. Sensitive Analysis	23
6. Plan for the Improvement of Analysis Code	32
7. Conclusions	35
Acknowledgements	35
References	35
Appendix Analytical Conditions and Results of All Test Cases	37

This is a blank page.

1. はじめに

高温工学試験研究炉 (High Temperature Engineering Test Reactor : 以下、HTTR という。) は、高温ガス炉技術の基盤の確立、熱利用技術の基盤の確立および高温での先端的照射研究を行う目的で、日本原子力研究所大洗研究所に建設された、原子炉出力 30 MW、原子炉出口冷却材温度最高 950°C の我が国初の高温ガス炉である⁽¹⁾。HTTR は 1998 年 11 月 10 日に初臨界に達した後、1999 年 9 月から出力上昇試験を開始し、2001 年 12 月 7 日に原子炉出力 30MW、原子炉出口冷却材温度 850°C を達成した。2002 年 3 月 6 日には、定格運転（原子炉出口冷却材温度 850°Cまでの運転）の使用前検査合格証を取得した⁽²⁾。使用前検査合格証の取得後、原子炉出口冷却材温度 950°C の達成を目指すとともに、高温ガス炉の固有の安全性を実証するための安全性実証試験を実施している。

HTTR を用いた安全性実証試験は、炉心熱容量が大きく、負の反応度フィードバック特性に優れている高温ガス炉の固有の安全性を定量的に実証し、高温ガス炉技術の高度化に資するために行うものである⁽³⁾。具体的な目的は下記に示すとおりである。

- 反応度投入や炉心除熱量の減少等の異常・事故に分類される事象を、実機の高温ガス炉である HTTR において試験として模擬し、高温ガス炉の固有の安全性を実証する。
- 試験時の原子炉挙動データを取得し、安全解析コードの精度を向上させ、過度の保守性を排除した安全設計・安全評価技術を確立する。
- 最終的には安全評価により、高温ガス炉では仮に苛酷事故が発生したとしても、敷地周辺の住民の避難を必要としないこと等を明らかにする。

反応度投入事象を模擬した制御棒引抜き試験では、制御棒の駆動を「自動」から「手動」に切替えた状態で、炉心中央位置の制御棒を引抜く。この試験により、制御棒の自動操作による原子炉出力の制御が行なわれなくても、負の反応度フィードバック特性のみにより原子炉出力の過度な上昇が抑制され、原子炉が安定な状態に落着くことを実証する。制御棒引抜き試験については、2002 年 6 月に原子炉出力 9MW での予備試験を実施した後、2003 年 3 月に原子炉出力 15MW での試験を実施してきている。

制御棒引抜き試験の動特性解析については、高温ガス炉のプラント動特性解析コード ACCORD⁽⁴⁾により実施している。ACCORD コードの動特性解析モデルは、HTTR の設置許可申請時の安全評価⁽¹⁾で使用した BLOOST-J2 コード⁽⁵⁾を基にしており、炉心を単チャンネルで代表させた 1 点炉近似によるものである。

本報は、原子炉出力 9MW 及び 15MW での制御棒引抜き試験の動特性解析結果について示したものである。2 章では、制御棒引抜き試験に関連する HTTR の設備概要について示した。3 章では、制御棒引抜き試験の内容を示すとともに、4 章において ACCORD コードによる制御棒引抜き試験の動特性解析の結果について示した。制御棒引抜き試験の実測値と解析値を比較した結果、原子炉出力の挙動はほぼ実測値を再現することができたが、原

予炉出力の最大値と、出力が低下する挙動に実測値との差が生じている。また、5章では制御棒引抜き事象に対する、添加反応度、温度係数、物性値等の各パラメータの原子炉動特性への感度を明らかにした。6章では、今後の高温ガス炉動特性解析コードの改良方針について示した。

2. HTTR の設備概要⁽¹⁾

HTTR の炉心は、六角柱状の黒鉛ブロックである燃料体、制御棒案内ブロック、可動反射体ブロック等から構成し、これらの炉心構成要素を円柱状に積上げたものである。また、ブロックを積上げた軸方向の 1 列をカラムと称し、炉心は合計 61 カラムからなり、Fig. 2.1 及び Fig. 2.2 に示すように、燃料体を含む燃料領域及びその外側を囲む可動反射体領域に分けられる。各々の領域には、制御棒を挿入するための制御棒案内ブロックからなるカラムを設ける。

燃料体の構造図を Fig. 2.3 に示す。燃料体は、六角柱状の黒鉛ブロックに燃料棒を挿入する構造で、燃料棒は、黒鉛スリーブ、燃料コンパクト等から構成する。燃料コンパクトは、二酸化ウランの燃料核を熱分解炭素層等で四重に被覆した被覆燃料粒子を黒鉛と炭素の混合物からなる素地に分散した中空の円柱形状である。制御棒案内ブロックは、燃料体と同じ対面間距離の六角柱状の黒鉛ブロックで、制御棒案内ブロックには、2 本の制御棒を挿入する 2 個の孔と後備停止系の炭化ほう素と黒鉛粉末の混合焼成体を落下させるための 1 個の孔、計 3 個の孔を設ける。可動反射体ブロックは、燃料体と同じ対面間距離の六角柱状の黒鉛ブロックで、燃料領域の上下及び側部の可動反射体領域に配置する。燃料領域の上下の可動反射体ブロックには、燃料体の冷却材流路に対応した冷却孔を設ける。炉内構造物は、固定反射体ブロック、高温プレナムブロック、サポートポスト、炉床部断熱層等からなる炉心支持黒鉛構造物と炉心支持板、炉心支持格子、炉心拘束機構等からなる炉心支持鋼構造物及び遮へい体などで構成する。固定反射体ブロックは、積層ブロックからなる炉心の水平方向の変位を拘束して炉心を所定の位置に配置し、炉心拘束機構により、固定反射体を半径方向に締付けるとともに、固定反射体ブロックの水平方向の変位を拘束する。高温プレナムブロック、サポートポスト、炉心支持板、炉心支持格子、炉床部断熱層等は、炉心からの荷重を支持し、その荷重を原子炉圧力容器へ伝える。また、遮へい体は、上部遮へい体ブロック及び側部遮へい体ブロックからなり、主に熱中性子遮へい機能を有する。炉内構造物は、更に、原子炉内の流路の形成、炉心の流量配分、断熱等の機能を有する。

原子炉の反応度制御は、炉心に配置された 16 対の制御棒の操作により行う。この制御方式に加えて、過剰反応度を抑制するため、反応度調整材を使用する。制御棒は、常温から運転温度までの温度変化に伴う反応度変化、燃料の燃焼に伴う反応度変化、燃焼によるゼノン、サマリウムの濃度変化に伴う反応度変化や反応度調整材の濃度変化に伴う反応度変化等の全ての反応度変化を制御する。Fig.2.4 に制御棒の構造図を示す。制御棒は、原子炉圧力容器ふたに取付けた制御棒スタンドパイプ内部に収納した制御棒駆動装置により駆動され、制御棒案内ブロックに設けた制御棒挿入孔内を上下に移動する。制御棒は、軸方向に多分割した二重円筒ベント型であり、10 個の制御棒要素を支持板を介して連結棒に連結

し、各要素間は可とう性を有する構造であり、最下部には、ワイヤロープの万一の破断による制御棒の落下に備えて、ショックアブソーバが設置されている。制御棒の中性子吸收材は、炭化ほう素と黒鉛粉末を混合焼成したもので、耐食耐熱超合金（Alloy 800H）製の被覆管内に収納される。

1次冷却材の流量は、Fig.2.5 に示すように1加圧水冷却器のガス循環機の出口側に設けられた流量計により計測し、1次冷却材流量制御系により運転中一定値に制御されている。

1次冷却材は、原子炉圧力容器の底部に設けた1次ヘリウムガス配管と二重管の内管との間の環状流路から原子炉圧力容器内に入り、原子炉圧力容器の内壁に沿って上方向に流れ、炉心上部のプレナムに至る。その後、1次冷却材は、炉心内を下降しながら高温となり、炉心下部の高温プレナムで混合した後、二重管の内管へ送られる。なお、二重管の内管は、1次ヘリウムガス配管を通って高温プレナムまで配管されている。冷却材の温度は、Fig.2.5 に示すようにガス循環機の出入口、原子炉の出入口、炉心の出入口、および炉心側部で計測している。

HTTR の中性子計装は、広領域及び出力領域の中性子計装によって構成し、原子炉停止状態から定格出力の 120% までの中性子束レベルを監視する。中性子束検出器の設置場所を Fig. 2.6 に示す。固定反射体内に広領域中性子束検出器を、1次側部遮へい体内面に出力領域中性子束検出器を設置して、原子炉出力に比例した中性子束レベルを連続測定する。中性子束検出器については、広領域中性子計装に核分裂計数管、出力領域中性子計装に非補償型電離箱を用いている。制御棒引抜き試験においては、出力領域中性子計装の信号により試験中の原子炉出力の変化を測定している。また、HTTR の反応度計では、出力領域中性子計装の信号から、逆動特性法により原子炉の全反応度を算出している。

原子炉出力制御系は、原子炉出力 30% (9MW) 以上で使用する。原子炉出力制御系の構成図を Fig. 2.7 に示す。原子炉出力 30~100 % (9~30MW) では、原子炉出力が運転モード選択装置から与えられた設定値に追従するように、制御棒位置指令信号を駆動信号に変換して制御棒駆動装置に送信し、制御棒の位置を調節する。制御棒引抜き試験においては、原子炉出力制御系は手動操作に切替えられるとともに炉心中央の制御棒を除く 15 対の制御棒駆動電源が遮断され、炉心中央の制御棒のみが操作できる。

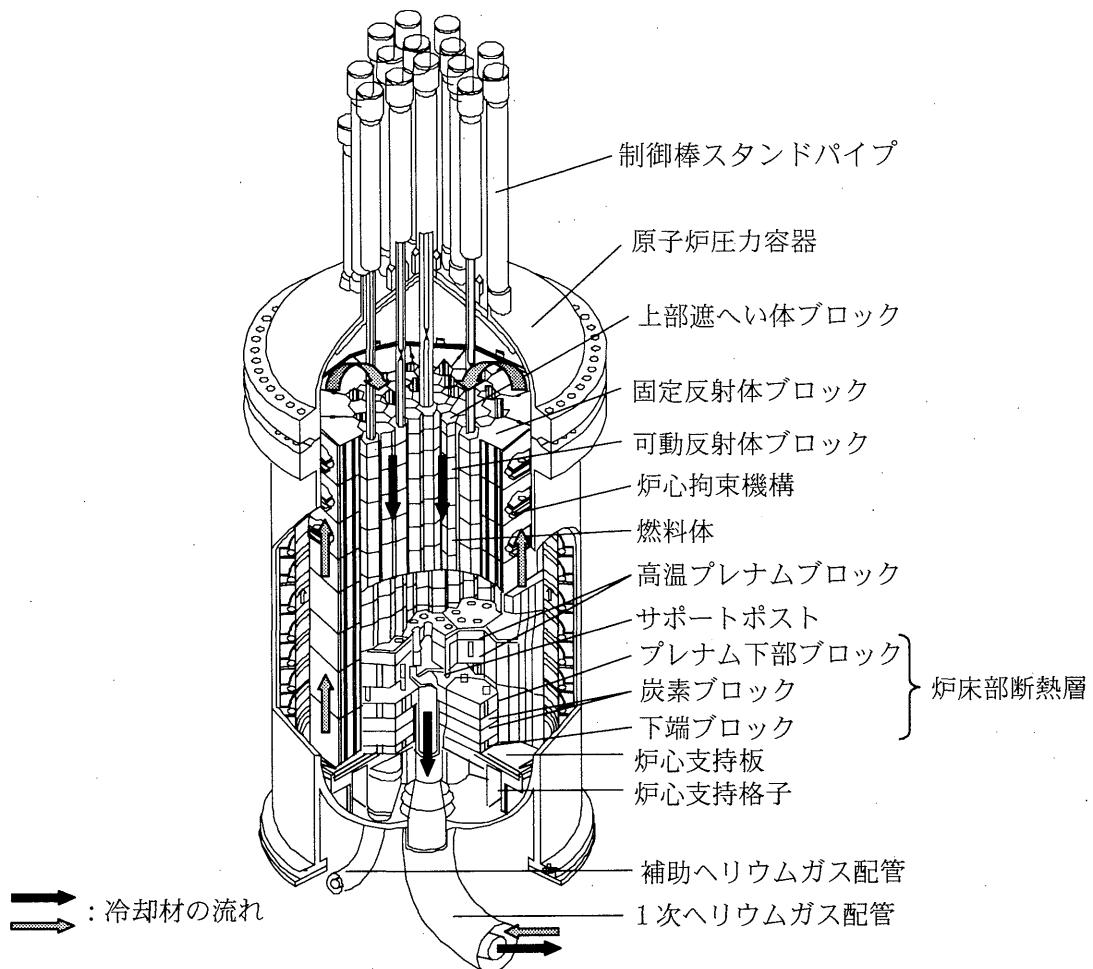


Fig.2.1 HTTR の原子炉構造（1）

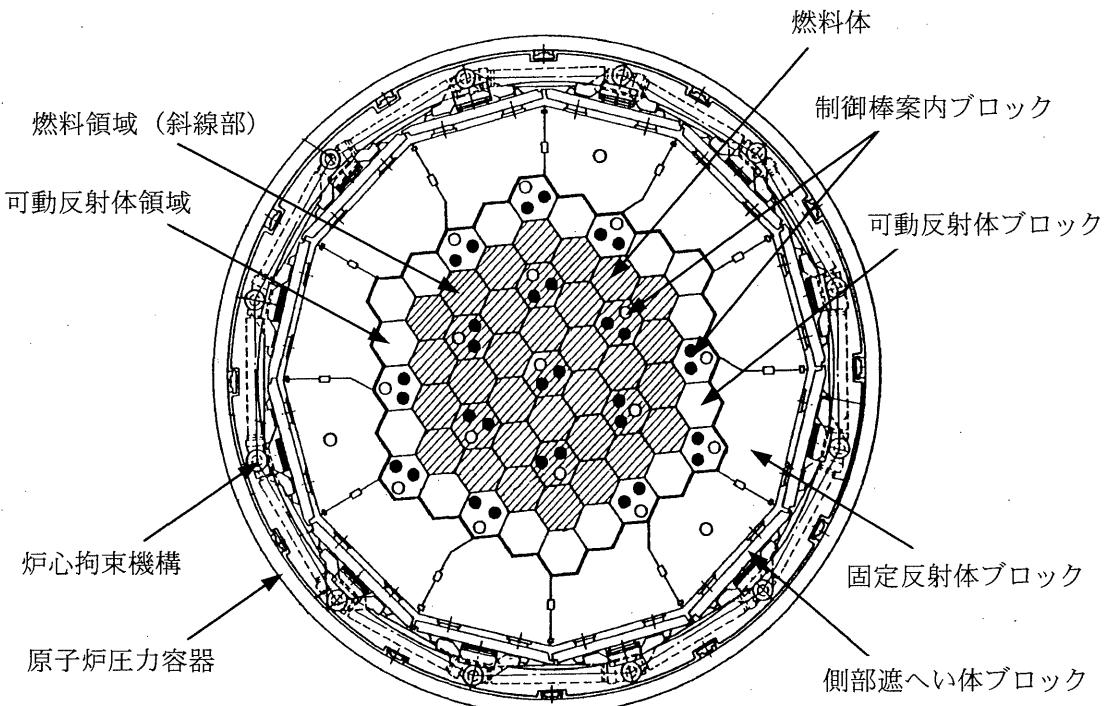


Fig.2.2 HTTR の原子炉構造（2）

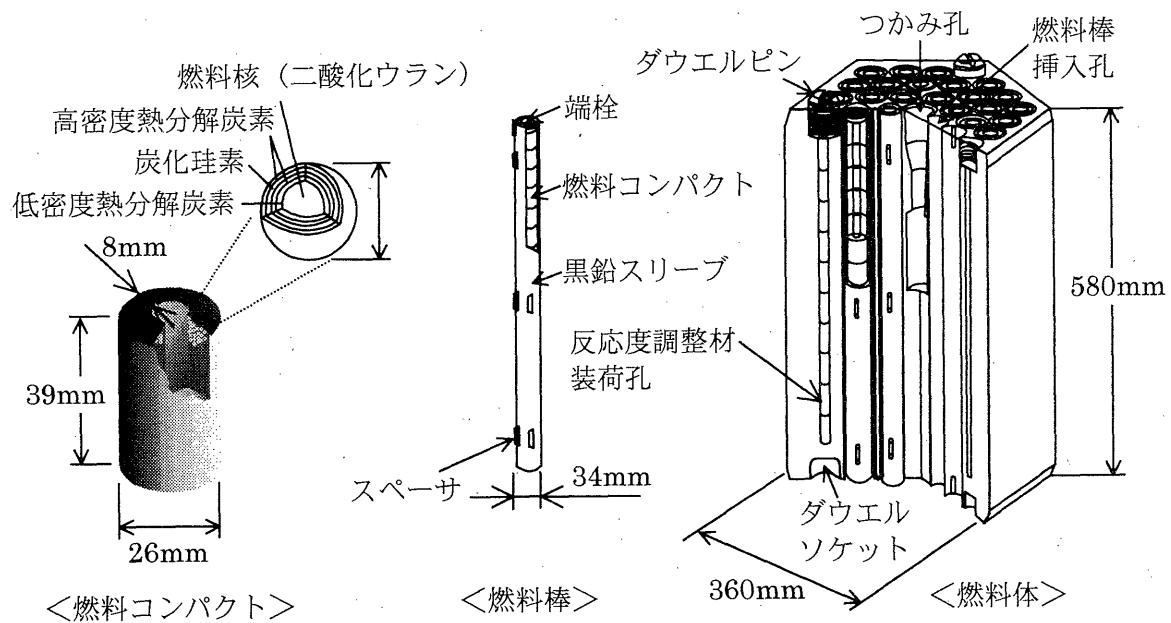


Fig.2.3 HTTR の燃料体構造

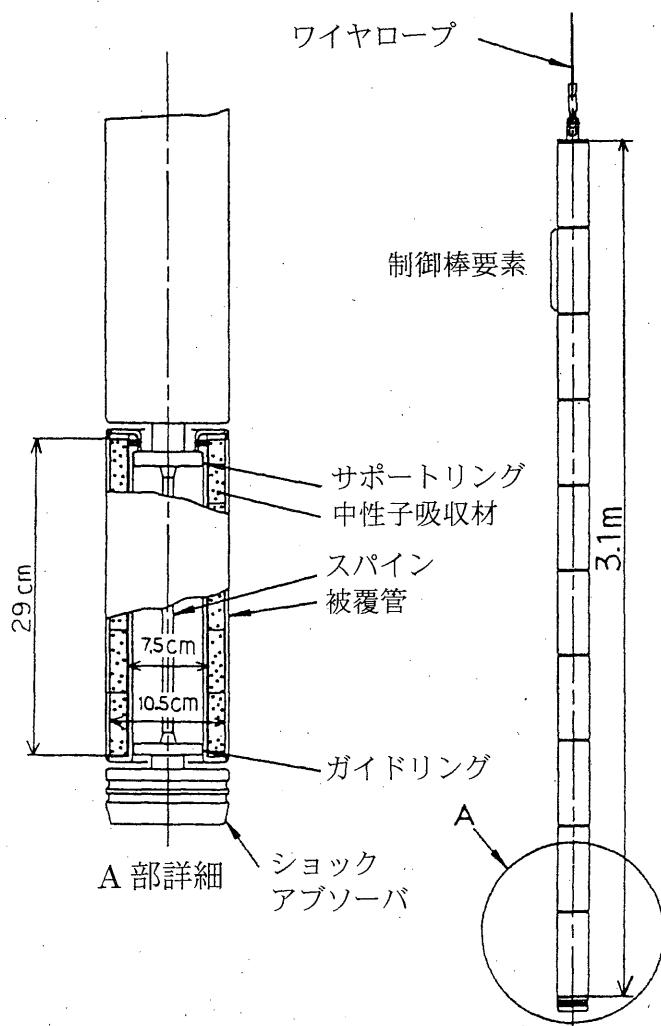


Fig.2.4 HTTR の制御棒構造

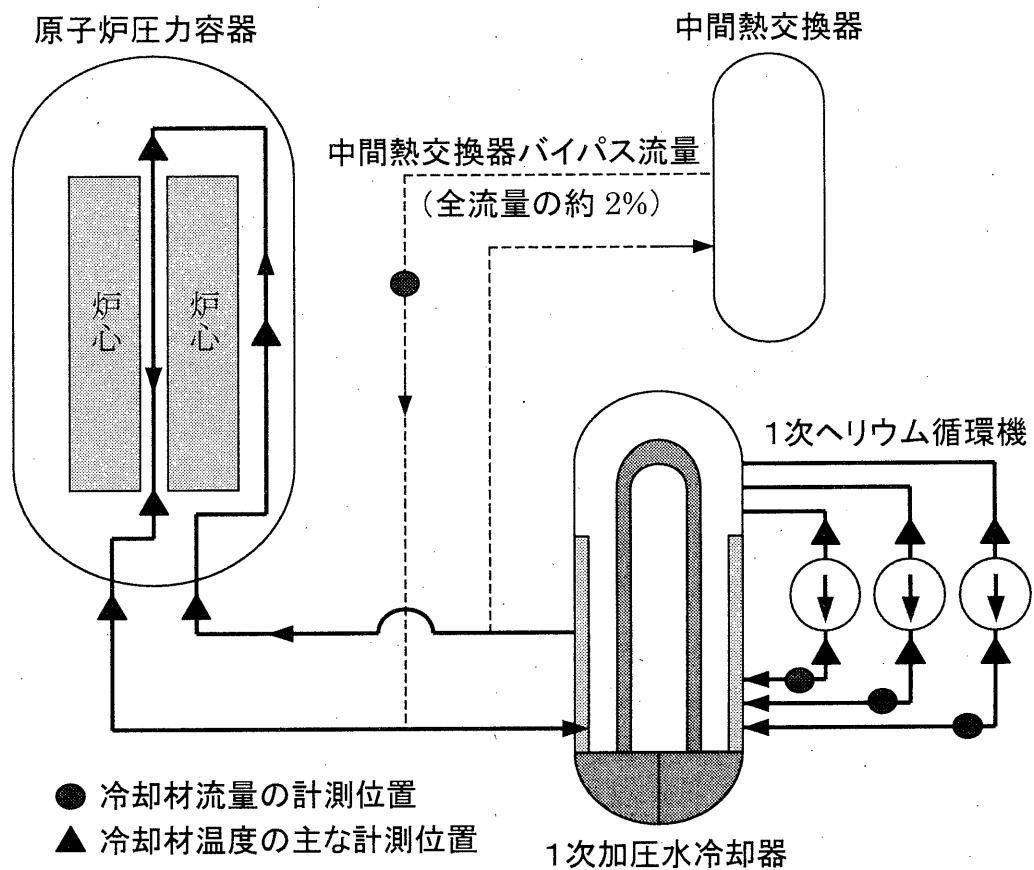


Fig.2.5 冷却材流量と冷却材温度の計測点

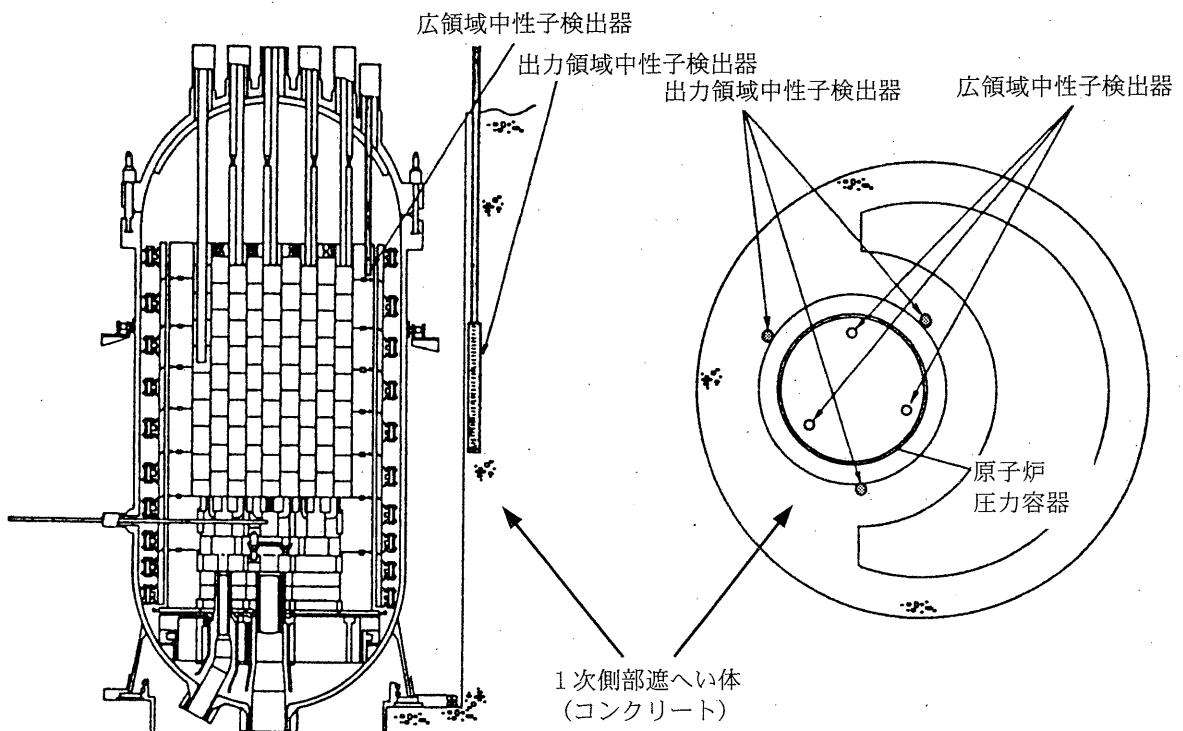


Fig.2.6 中性子検出器の設置位置

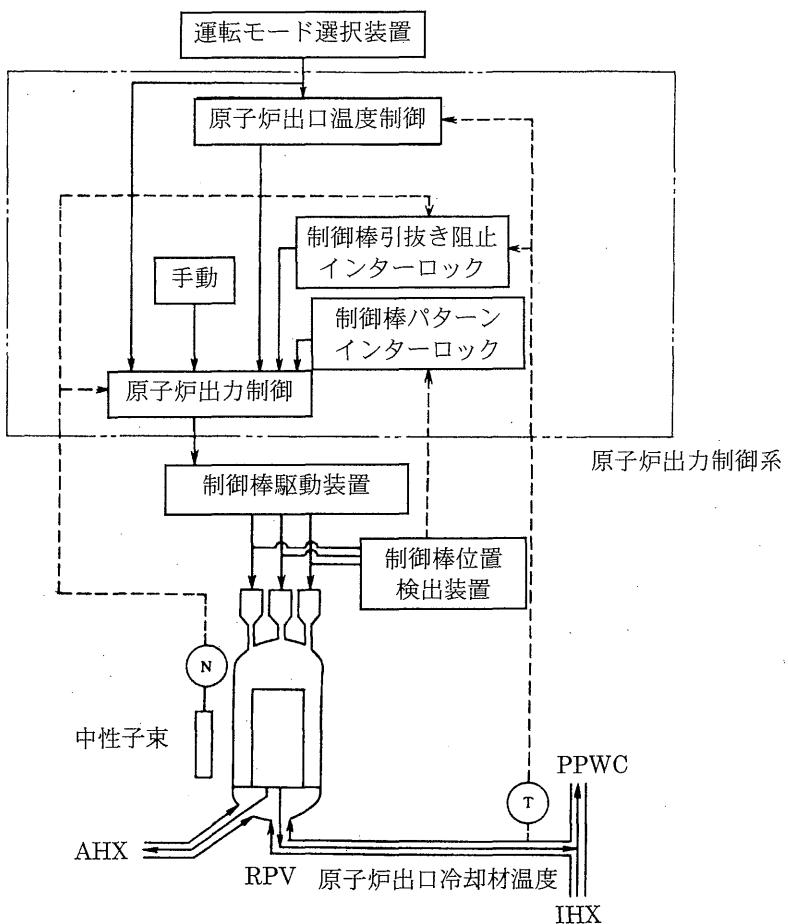


Fig.2.7 原子炉出力制御系の構成

3. 制御棒引抜き試験の概要

3. 1 試験目的⁽⁶⁾

制御棒引抜き試験では、制御棒の引抜きにより反応度を添加し、負の反応度フィードバック特性によって過度な出力上昇が抑制され、原子炉が安定な状態に落ち着き、この間、冷却材温度や炉内構造物温度等の変化が緩慢であることを実証する。

3. 2 試験手順

Fig. 3.1 に示すように、HTTR の炉心には全部で 16 対の制御棒が配置されている。通常運転時には、最外周にある R・3 制御棒 3 対を燃料領域の上面まで引抜き、残りの 13 対の制御棒位置を揃えた状態で出力を維持している。試験では、この状態から炉心中央にある C 制御棒 1 対を引抜くことにより反応度を添加する。このとき、運転モードの変更により制御棒の操作モードは「自動」から「手動」になるとともに、C 制御棒以外の制御棒の操作不可となる。具体的な試験手順を Fig. 3.2 に示す。

3. 3 試験条件

制御棒引抜き試験の試験条件は以下の通りである。

- ・初期原子炉出力 : 9MW, 15MW, 18MW, 24MW
- ・引抜き対象制御棒 : 中心制御棒 (C 制御棒)
- ・制御棒引抜き速度 : 1mm/sec, 5mm/sec
- ・炉心冷却材流量 : 44.6 ton/hr

試験では初期原子炉出力、制御棒引抜き速度、および制御棒引抜き量をパラメータとして複数ケース実施する。現在までに、初期原子炉出力や 9MW と 15MW の試験を実施した。

3. 4 試験結果

初期原子炉出力 9MW からの試験結果について Fig. 3.3 に、15MW からの試験結果について Fig. 3.4 にそれぞれ示す。15MW からの試験のうち、15MW-6 のケースでは制御棒を 40mm 引抜く計画であったが、制御棒を引抜いている際の出力変化率が制御棒引抜阻止インターロックの設定値に達し、制御棒の引き抜きが 29mm までで阻止された。各試験における試験結果をまとめると Table 3.1 のとおりとなる。制御棒の引抜き速度は、試験ケースによって若干変化するため、制御棒位置の実測データから求めた各ケースの値を示した。試験ケースによって原子炉初期出力が若干異なるため、Fig. 3.3 と Fig. 3.4 の試験結果を出力変化量で表すと Fig. 3.5 と Fig. 3.6 のとおりとなる。9MW の試験結果

(Fig. 3.5) で、制御棒を高速で 41mm 引抜いたケースと低速で 41mm 引抜いたケースとで出力の最大値が大きく異なるのは、炉心温度変化の一次遅れにより、低速で引抜いた方が負の反応度フィードバック効果が大きくなるためである。この効果は 15MW の試験よりも 9MW の試験の方が大きく表れている。

Table 3.1 制御棒引抜き試験の試験条件及び結果

試験ケース	試験条件			試験結果
	初期 原子炉出力 (MW)	制御棒 引抜き速度 (mm/sec)	制御棒 引抜き量 (mm)	原子炉出力 最大値 (MW)
9MW-1	8.9	1.47	21	9.6
9MW-2	9.0	1.48	41	10.2
9MW-3	9.1	4.64	24	9.9
9MW-4	9.1	4.45	41	10.6
15MW-1	15.3	1.47	21	16.3
15MW-2	15.3	1.47	31	16.8
15MW-3	15.5	1.49	41	17.3
15MW-4	15.0	4.45	19	16.0
15MW-5	15.1	4.35	29	16.6
15MW-6	15.2	4.44	29	16.7
15MW-7	15.1	4.38	11	15.8

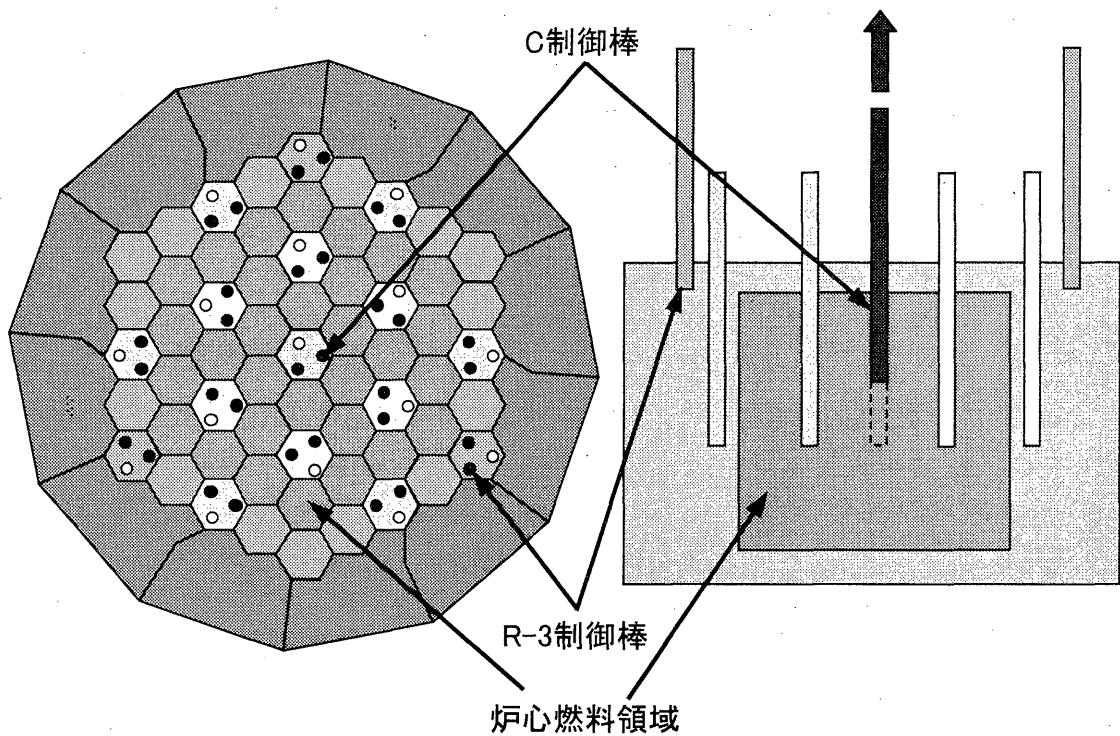


Fig. 3.1 制御棒引抜き試験における制御棒配置

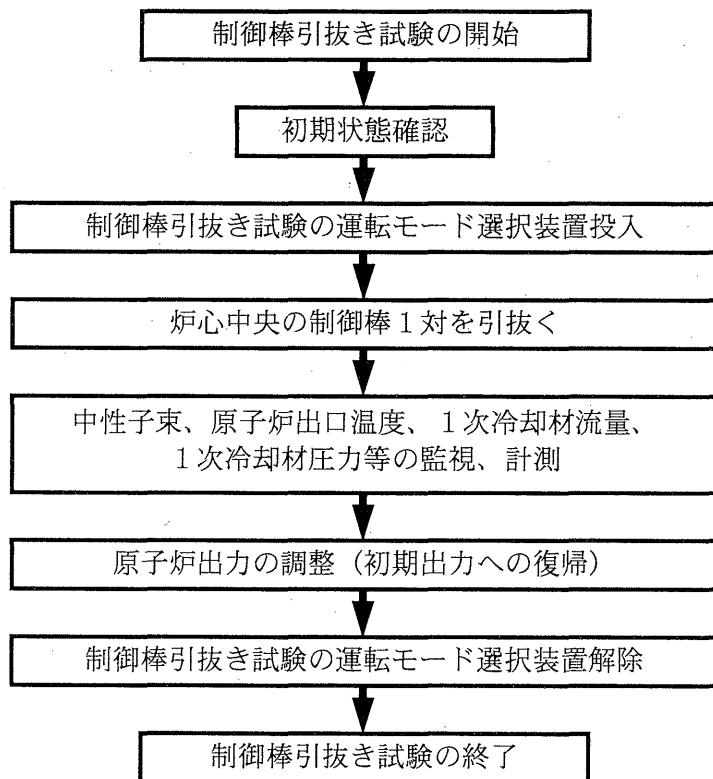


Fig. 3.2 制御棒引抜き試験の試験手順

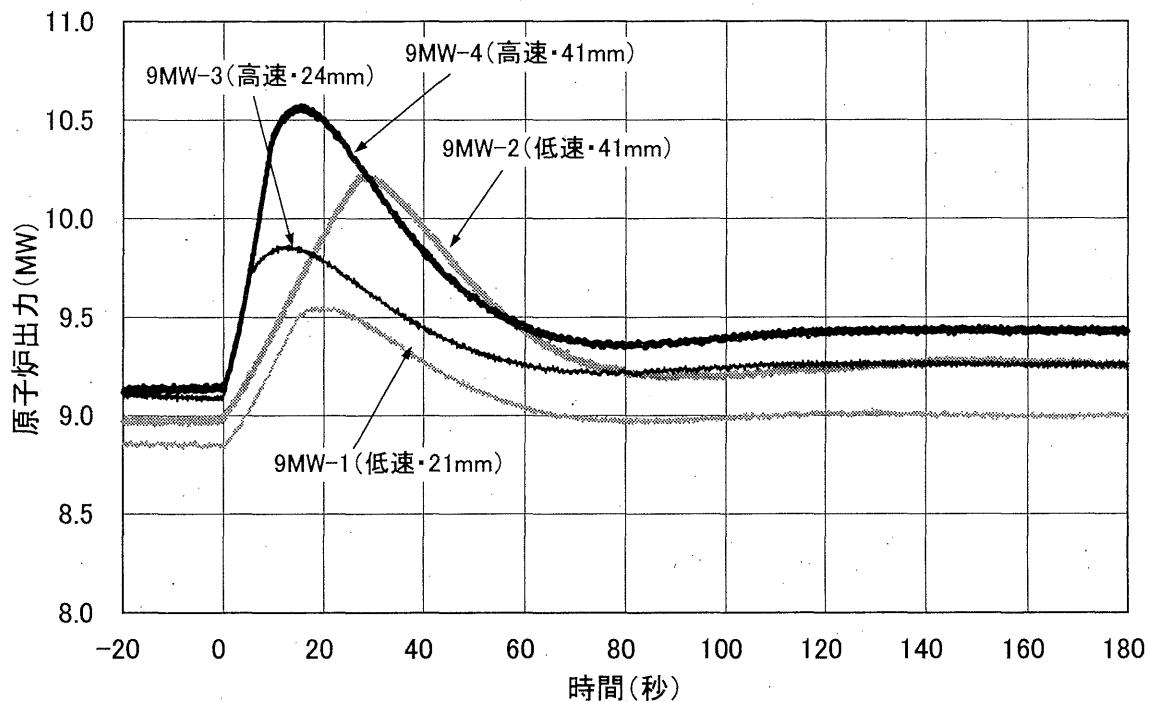


Fig. 3.3 原子炉出力 9MW からの制御棒引抜き試験結果

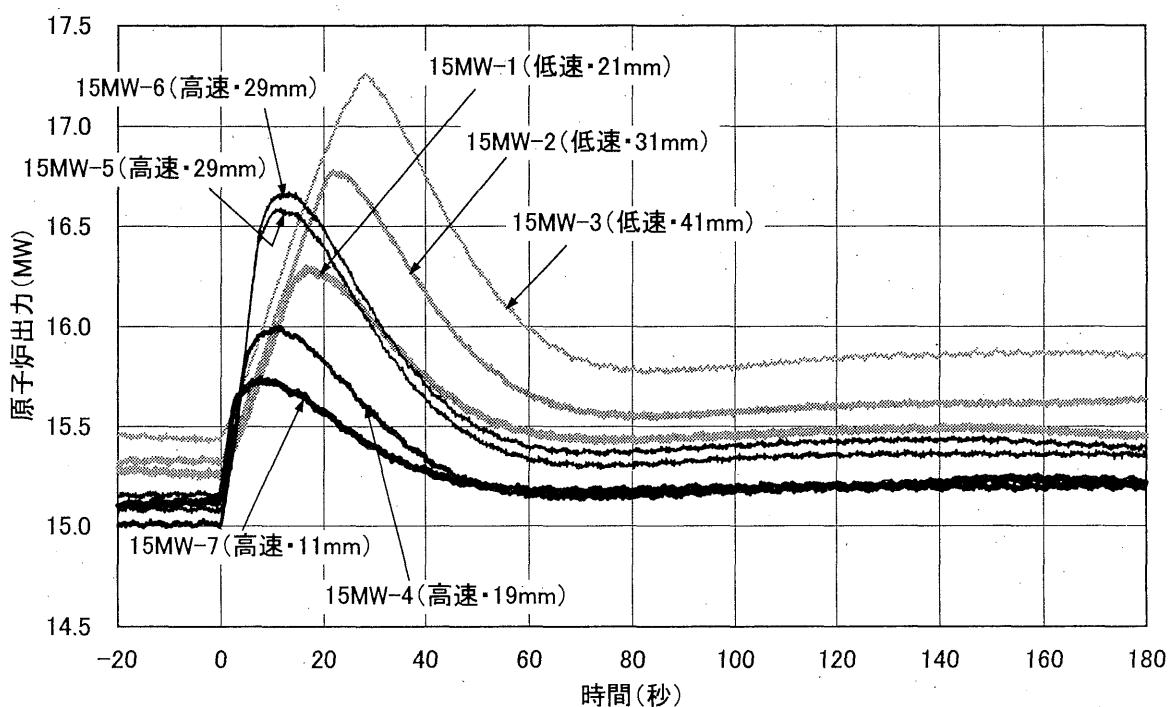


Fig. 3.4 原子炉出力 15MW からの制御棒引抜き試験結果

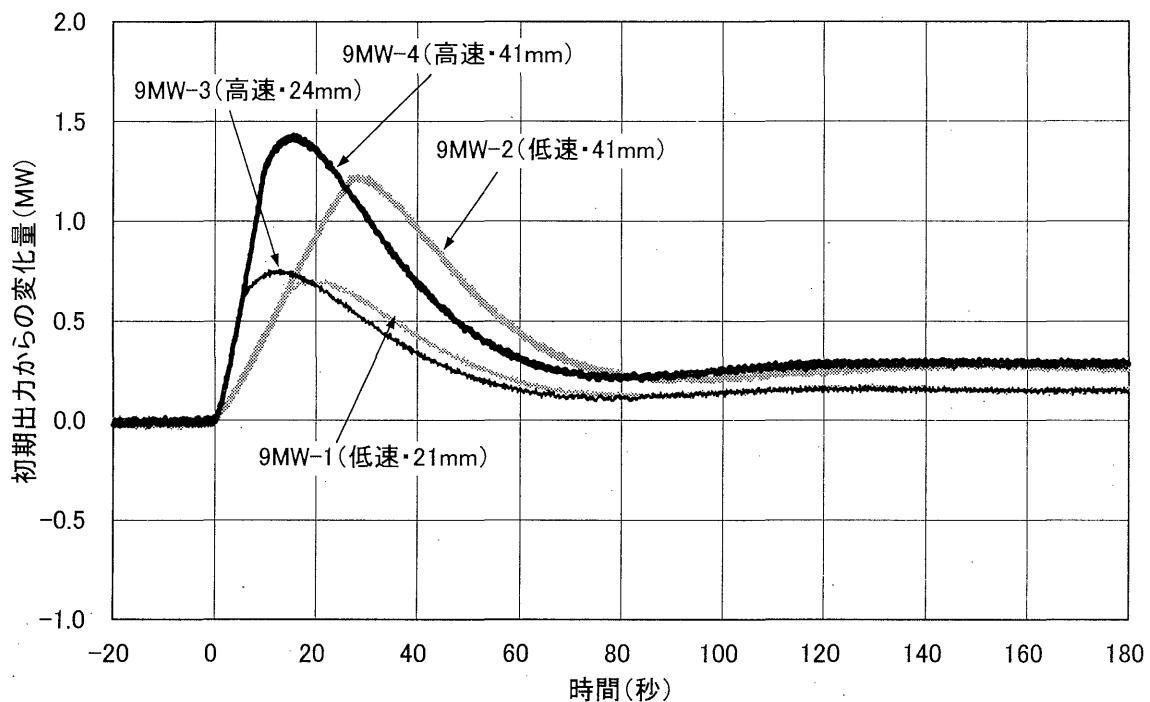


Fig. 3.5 原子炉出力 9MW からの制御棒引抜き試験結果
(初期出力からの変化量で整理)

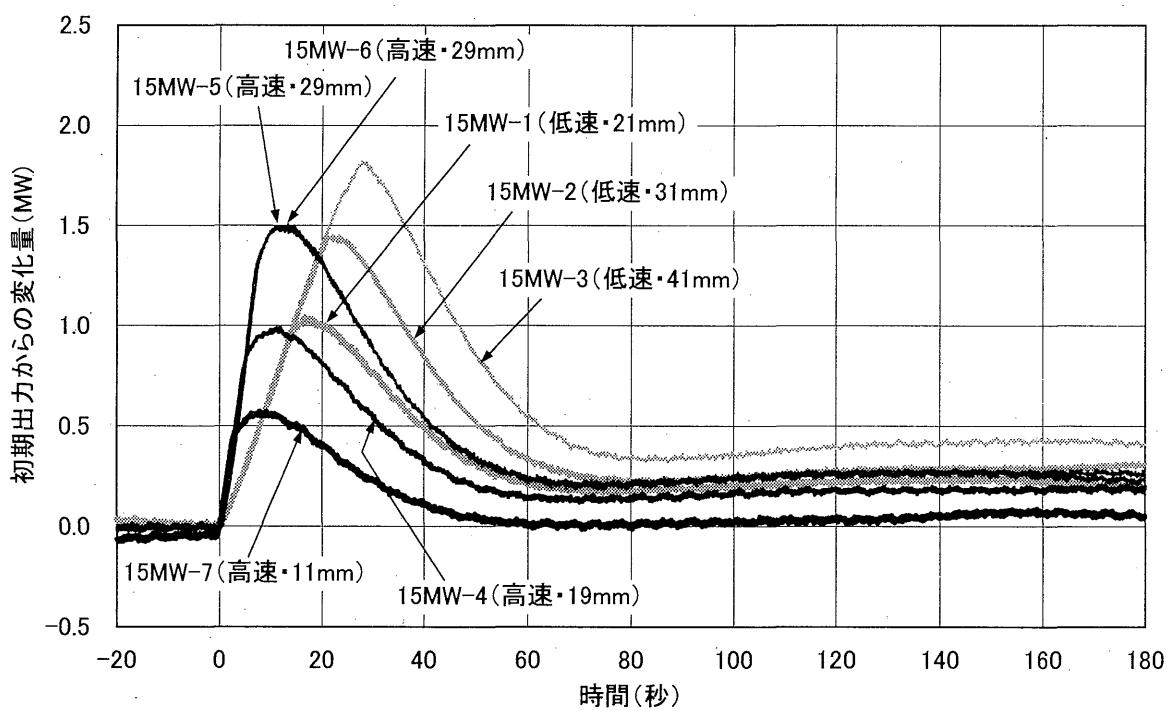


Fig. 3.6 原子炉出力 15MW からの制御棒引抜き試験結果
(初期出力からの変化量で整理)

4. 動特性解析

4. 1 ACCORD コード⁽⁴⁾の概要と解析手順

ACCORD コードは、高温ガス炉のプラント動特性を解析するコードであり、Fig. 4.1 に示すように核計算モジュール、伝熱計算モジュール、流動計算モジュール、制御系モジュール、安全保護系モジュールで構成される。これらのモジュールを組み合わせることにより、プラント全体の定常、過渡応答の評価が可能となる。ACCORD コードでは、HTTR の原子炉のほか、主冷却設備や補助冷却設備を構成する熱交換器や配管がモデル化されているが、制御棒引抜き試験の動特性解析の場合、原子炉内の伝熱特性と核特性に着目すれば良いため、これらについて以下に説明する。

ACCORD コードの炉心部伝熱計算モデルを Fig. 4.2 に示す。HTTR には全部で 954 本の燃料チャンネルが存在するが、ACCORD コードでは 1 本の燃料チャンネルで代表させた 2 次元体系によりモデル化している。

ACCORD コードを用いた制御棒引抜き試験の動特性解析の流れを Fig. 4.3 に示す。動特性解析にあたっては、核特性として制御棒引抜き試験時の添加反応度及び温度係数のデータが必要となる。これらは連続エネルギーモンテカルロ計算コード : MVP を用いて評価した。試験の初期状態や制御棒の引抜き量などは、実測値を用いた。ACCORD コードでは、外乱データとして与えた添加反応度の時間変化に従い、伝熱計算、核計算を繰り返し、各状態値の時間変化を算出する。

解析結果として得られる原子炉出力の変化は全反応度の変化により求められる。全反応度は制御棒の操作によって与えられる反応度と、燃料温度変化による反応度、減速材温度変化による反応度、および Xe 濃度変化による反応度からなる。ここで、燃料温度と減速材温度の変化は、炉心部伝熱計算の結果を用いる。なお、一点炉近似モデルであることから、制御棒引抜きにより生ずる僅かな出力分布の変化については、これを無視している。

4. 2 制御棒引抜き試験の動特性解析

Table 3.1 に示した試験ケースのうち、代表ケースとして初期原子炉出力 15.2MW の状態から、制御棒を高速モードで 29mm 引抜いたケース (15MW-6) の動特性解析について、主要な解析条件の設定根拠と解析結果を以下に、解析に使用した値を Table 4.1 に示す。

(1) 解析条件

① 初期原子炉出力

出力領域中性子束の実測データより 15.2MW と設定した。中性子束は 3 台の検出器で測定しており、これら 3 台の平均値とし、さらに制御棒引抜き前の約 10 秒間のデータを平均した。

② 制御棒引抜きによる添加反応度

試験時の制御棒の引抜き量は、引抜き前後の制御棒位置の変化量より 29mm とした

(初期制御棒位置 : 2477mm、引抜き後制御棒位置 : 2506mm)。MVP コードにより制御棒引抜き量 40mm に対して求められた添加反応度に対し、引抜き量の補正を行い、さらに中性子吸収体部の軸方向詳細構造を考慮した表面積補正等を行い、 $0.034\% \Delta k/k$ (5.3%) と設定した。MVP 計算の統計誤差は約 20% (2σ 相当) である。

③ 制御棒引抜き速度

試験時の制御棒の引抜き速度を 4.4mm/s とした。これは制御棒位置変化の実測データから、引抜き中の平均速度を求めて設定した。

④ 燃料温度係数

MVP 計算の評価値に燃焼日数を考慮した補正を行い、 $-4.5 \times 10^{-5} \Delta k/k/\text{^\circ C}$ とした。

MVP 計算の統計誤差は約 10% (2σ 相当) である。

⑤ 減速材温度係数

MVP 計算の評価値に燃焼日数を考慮した補正を行い、 $-3.1 \times 10^{-5} \Delta k/k/\text{^\circ C}$ とした。

MVP 計算の統計誤差は約 15% (2σ 相当) である。

⑥ 遅発中性子割合

炉心体系からの中性子の漏れの効果及び燃焼の効果を考慮し、実効遅発中性子割合として 0.65% を使用した。

⑦ 即発中性子寿命

拡散計算による即発中性子寿命の燃焼 150 日の評価値 ($9.4 \times 10^{-4}\text{s}$) を使用した。

(2) 解析結果

制御棒引抜き試験時の制御棒位置の実測値と、原子炉出力の実測値および解析値について Fig. 4.4 に示す。制御棒が引抜かれると、正の反応度添加により原子炉出力が上昇するが、炉心温度の上昇に伴う負の反応度フィードバック効果により、原子炉出力はピーク値を示した後低下し、約 100 秒後に整定する。実測値と解析値を比較した場合、原子炉出力の初期値からの上昇幅は解析値の方が大きくなっているものの、試験開始後 200 秒以降の整定値はほぼ実測値を再現している。実測値と解析値の差は、原子炉出力がピークを示した後に負の反応度により低下する過程において最も大きくなっている。

Fig. 4.5 は、制御棒引抜き時の反応度収支の解析値と、全反応度の実測値を示したものである。解析では、制御棒の引抜きによって添加される反応度、燃料温度変化によって生じる反応度、減速材温度変化によって生じる反応度、Xe 濃度変化による反応度を合計した全反応度から原子炉出力を求めている。但し、Xe 濃度変化による反応度の影響は、このような数百秒の挙動では無視できる。Fig. 4.5 から分かるとおり、約 5mm/s で制御棒を引抜いた場合、制御棒の引抜きによる反応度添加の速さに比べて燃料温度の上昇スピードが遅いため、全反応度のピーク値は制御棒による反応度添加量に近い値となっている。また、ピーク値以降の全反応度の挙動は、燃料温度変化による反応度の挙動と相似形になっている。減速材温度の変化は燃料温度変化よりも小さく、また燃料温度と比べてゆっくりと変化するため、全反応度へ与える影響はほとんどない。燃料温度変化による反応度と減速材温度

変化による反応度は、Fig. 4.6 に示す温度変化と、温度係数によって決定されるものである。

なお、解析条件のうち、添加反応度は MVP 計算の統計誤差が 20%と大きく、制御棒引抜き後の原子炉出力のピーク値に最も影響することから、添加反応度を計算誤差の範囲（±20%）で変化させた場合についても出力変化を評価した。原子炉出力の解析結果を Fig. 4.7 に示す。原子炉出力のピーク値の実測値は、添加反応度をマイナス 20%としたケースとノミナル値を用いたケースの間に入っているが、ピーク後の挙動については、添加反応度のノミナル値とマイナス 20%の間に入っていない。

Table 3.1 に示す全ての試験ケースについて、同様の動特性解析を行った結果を付録に示す。各ケースの原子炉出力の解析値をみると、制御棒を低速で 10mm～20mm 引抜いたケースではピーク値がほぼ実測値と一致しているが、その他のケースでは 0.1～0.3MW 程度解析値の方が大きな値となっている。

一方、反応度の解析値をみると、制御棒を低速で引抜いた場合には引抜きの途中で燃料温度変化による負の反応度の影響を大きく受けるため、全反応度のピーク値は抑えられているが、高速で引抜いた場合にはこの影響は小さく、さらに、高速で 10mm～200mm 引抜いたケースでは、全反応度のピーク値は制御棒引抜きによって添加される反応度にほぼ等しくなっている。

燃料平均温度の上昇幅は、制御棒の引抜き量が多いほど大きく、添加反応度を相殺する炉心の負の反応度効果と対応している。制御棒の引抜き量と引抜き速度が同じ条件の場合（例えば 9MW-2 と 15MW-3）、初期出力 9MW よりも 15MW の方が出力、燃料平均温度ともに上昇幅が大きくなっているが、これは燃料温度係数の絶対値は 9MW の方が一割程度大きいためであり、ほぼ同一の添加反応度に対して、これを補償するために必要となる燃料温度変化（出力変化）が 15MW の場合に大きくなることを意味している。

Table 4.1 制御棒引抜き試験動特性解析の解析条件

項目	解析条件	設定の根拠
初期原子炉出力 (MW)	15.2	出力領域中性子の実測値
制御棒引抜き量 (mm)	29	制御棒位置変化の実測データより設定
添加反応度 (%Δk/k)	0.034 (5.3 ¢)	モンテカルロ計算による制御棒反応度価値と制御棒引抜き量の実測データにより設定。計算誤差は約 20% (2 σ相当)
制御棒引抜き速度 (mm/sec)	4.4	制御棒位置変化の実測データより設定
燃料温度係数 (Δk/k/°C)	-4.5×10^{-5}	モンテカルロ計算の評価値、計算誤差は約 10% (2 σ相当)
減速材温度係数 (Δk/k/°C)	-3.1×10^{-5}	モンテカルロ計算の評価値、計算誤差は約 15% (2 σ相当)
遅発中性子割合 (%)	0.65	炉心体系からの中性子の漏れの効果及び燃焼の効果を考慮
即発中性子寿命 (sec)	9.4×10^{-4}	拡散計算による即発中性子寿命の燃焼 150 日の評価値

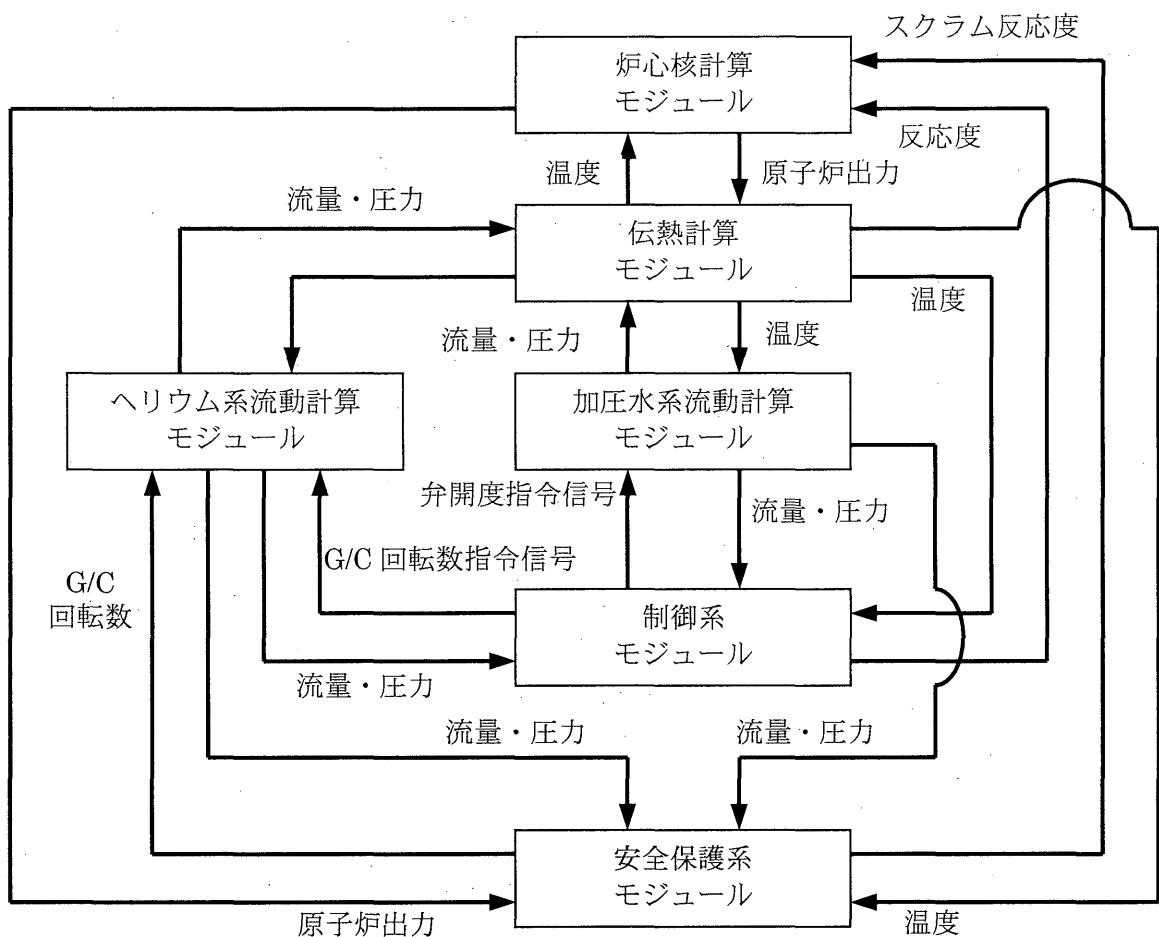


Fig. 4.1 ACCORD コードの計算体系

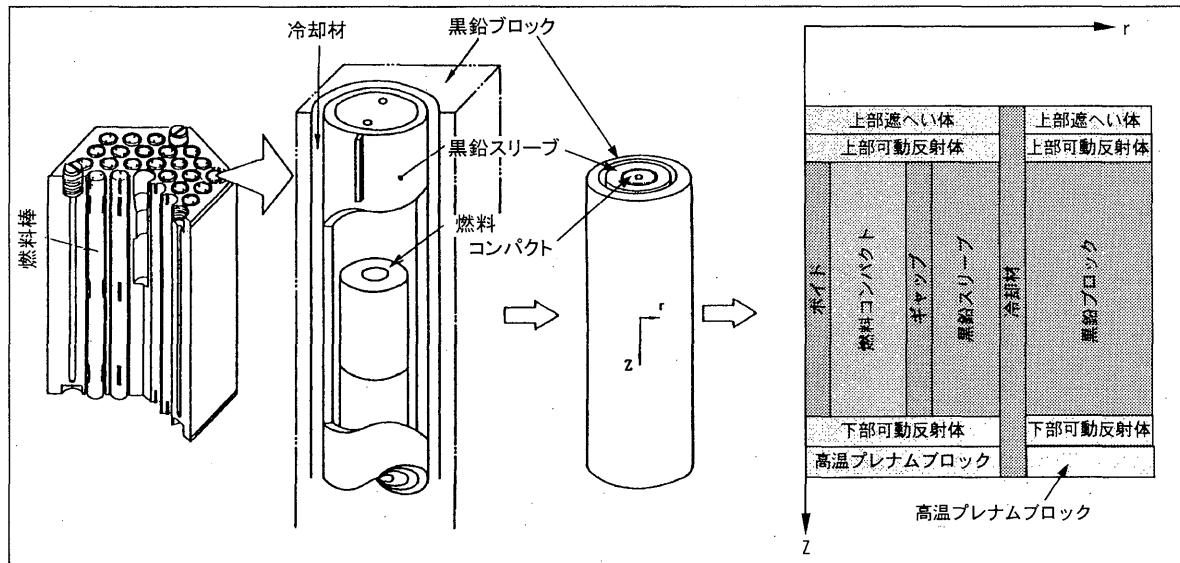


Fig. 4.2 ACCORD コードの炉心部伝熱計算モデル

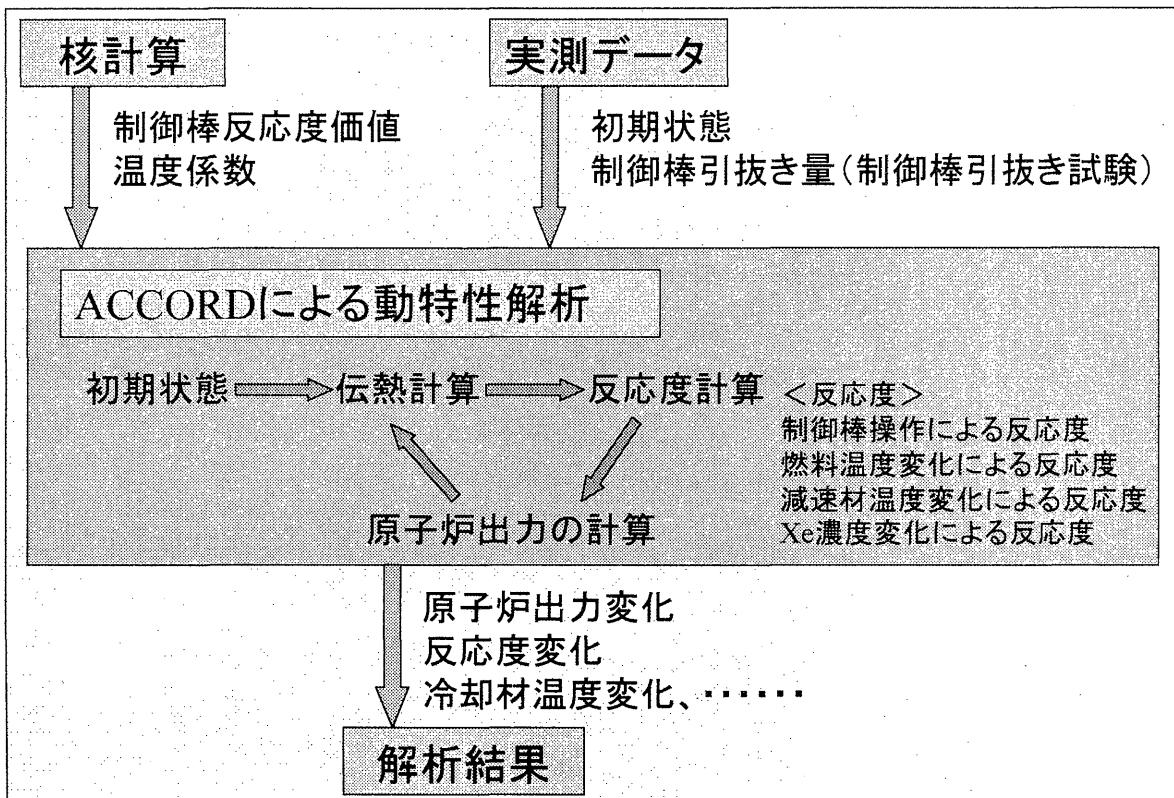
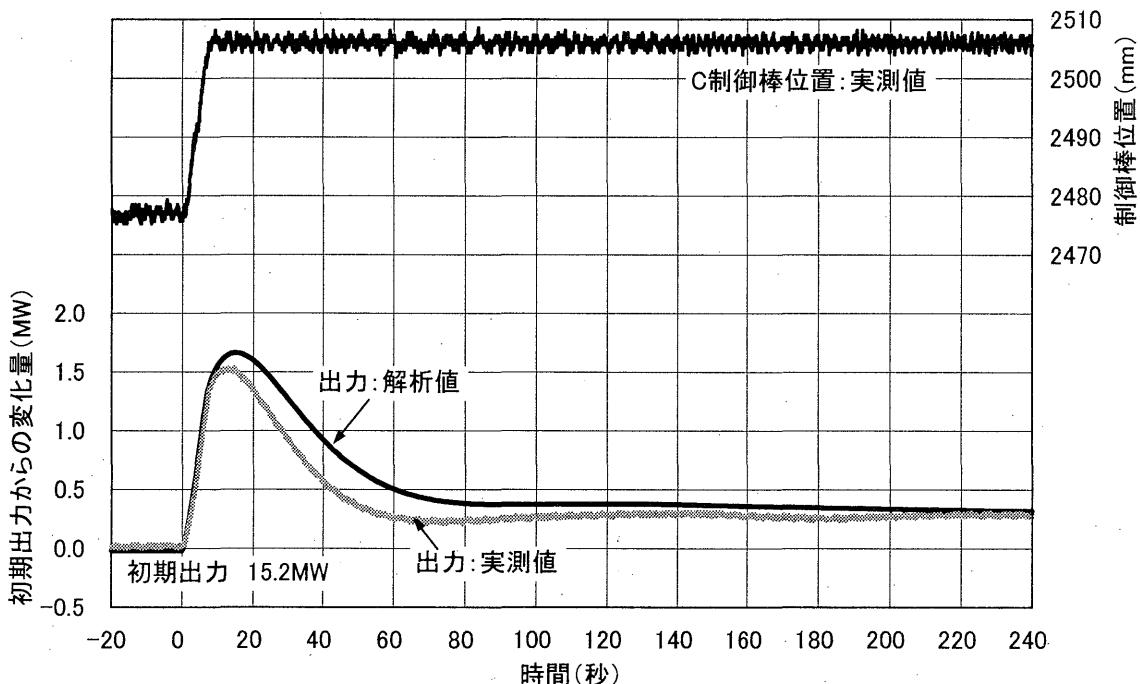


Fig. 4.3 ACCORD コードによる動特性解析の流れ

Fig. 4.4 制御棒引抜き試験の動特性解析結果：原子炉出力変化
(制御棒引抜き速度 4.4mm/sec, 引抜き量 29mm)

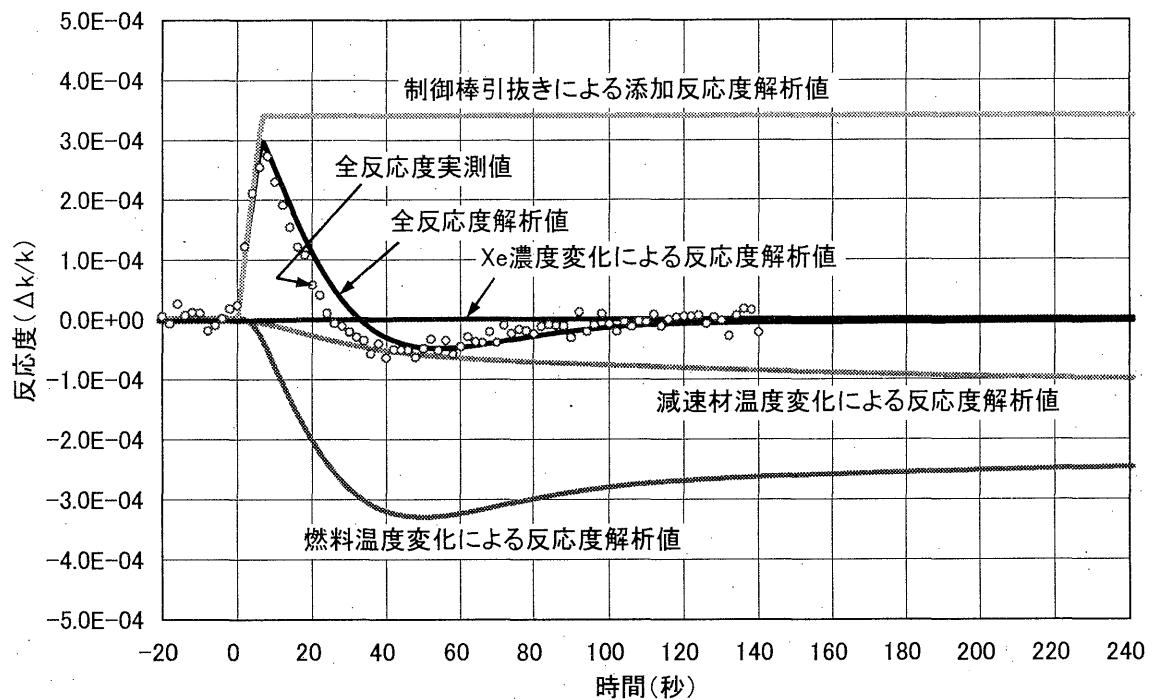


Fig. 4.5 制御棒引抜き試験の動特性解析結果：反応度変化
(初期出力 15.2MW, 制御棒引抜き速度 4.4mm/sec, 引抜き量 29mm)

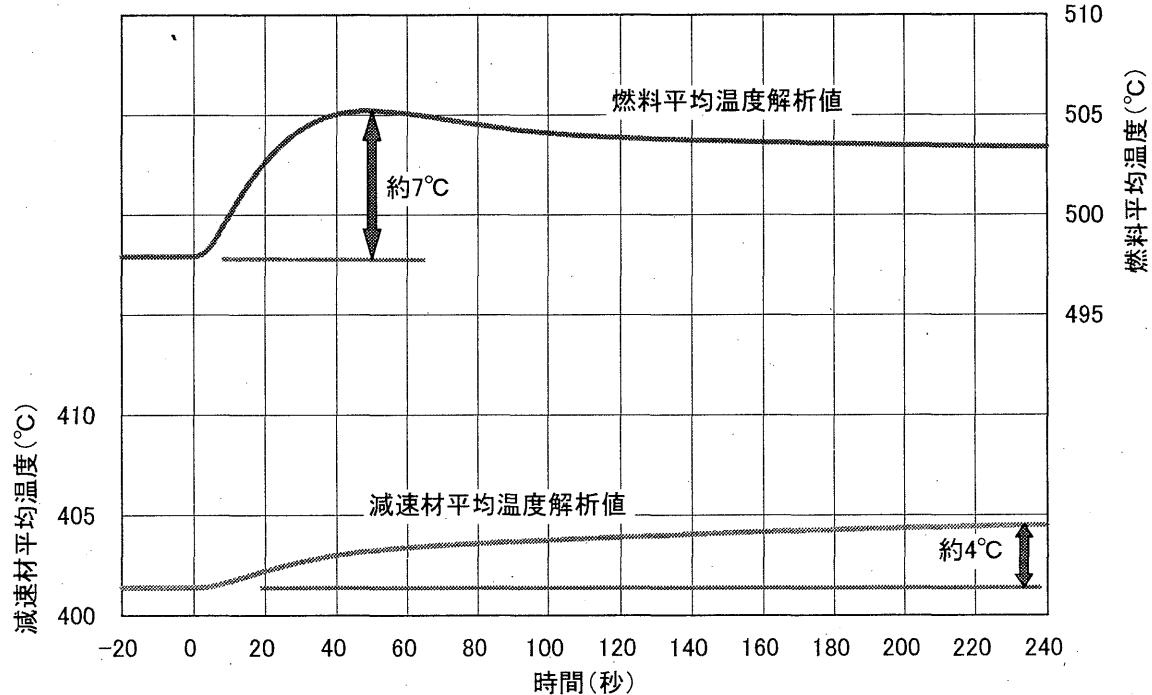


Fig. 4.6 制御棒引抜き試験の動特性解析結果：燃料、減速材温度変化
(初期出力 15.2MW, 制御棒引抜き速度 4.4mm/sec, 引抜き量 29mm)

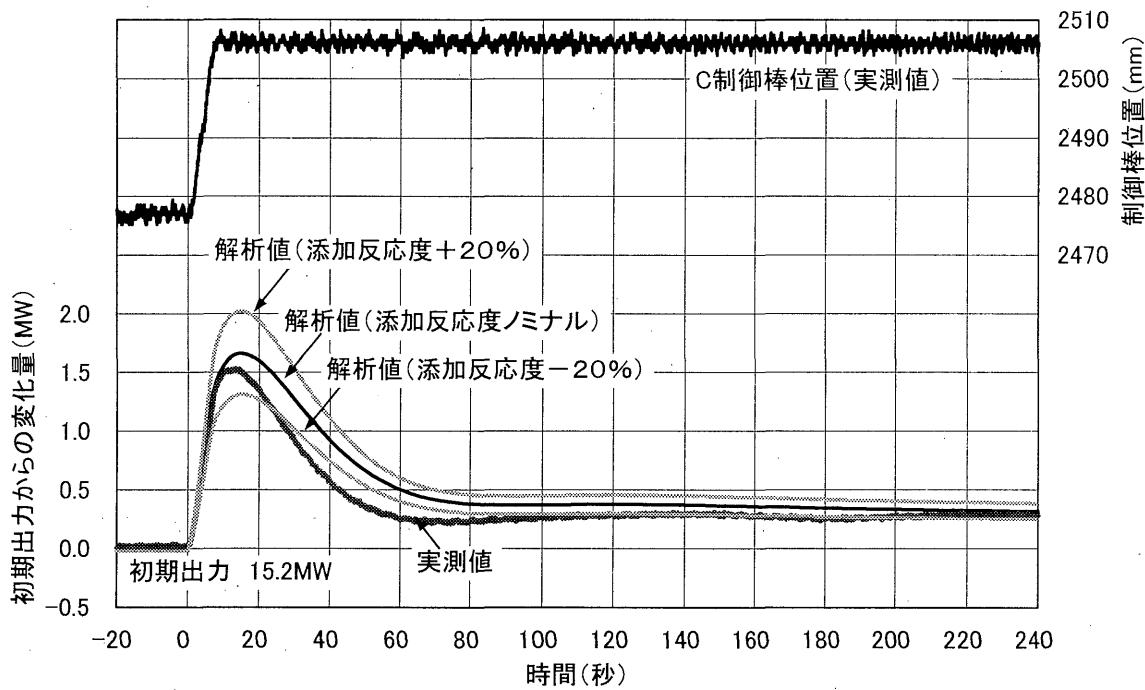


Fig. 4.7 制御棒引抜き試験の動特性解析結果：添加反応度の計算誤差の影響

(初期出力 15.2MW, 制御棒引抜き速度 4.4mm/sec, 引抜き量 29mm)

5. 感度解析

制御棒引抜き後の原子炉出力の変化は、燃料温度と減速材温度の変化に大きく影響を受ける。Fig. 4.6 に示すように燃料温度の変化は約 7°C、減速材温度の変化は約 4°C と僅かであり、より正確に温度評価をする必要がある。また、これらの温度は実測値との比較ができないことから、どの程度の信頼性を有しているかを特に明確にしておく必要がある。一方、添加反応度、燃料温度係数、減速材温度係数などのデータは MVP コードなどを用いた核計算の結果を用いているが、どのパラメータが解析結果に大きく影響を与えるのか把握しておく必要がある。ここでは、熱的および核的なパラメータについての感度解析結果を示す。

5. 1 热的パラメータに関する感度解析

(1) 燃料コンパクトの比熱

ACCORD の伝熱計算で用いている燃料コンパクトの比熱と、過去に得られた実験値との差は 2~3% 程度である。実験値の計測誤差数% を考慮して燃料コンパクトの比熱を土 10% 変化させた場合の影響を評価した結果を Fig. 5.1 に示す。原子炉出力のピークの値は若干変化するが、出力の整定値は基準ケースとほぼ同じであり、解析結果への感度は非常に小さい。

(2) 黒鉛スリープの比熱

Fig. 4.2 に示す炉心部伝熱計算モデルにおいて、黒鉛スリープの比熱を仮に 0.5 倍、2.0 倍と変化させた場合の影響を評価した結果を Fig. 5.2 に示す。原子炉出力のピークの値は、燃料コンパクトの比熱を土 10% 変化させた場合 (Fig. 5.1) とほぼ同程度の変化であった。また、原子炉出力の下がり方に大きな違いがみられるが、出力の整定値は基準ケースとほぼ同じ結果となった。黒鉛の比熱の不確かさ (5% 程度と想定) を考慮すると、本物性値の不確かさによる影響は考慮外と出来る。

(3) 黒鉛ブロックの熱容量

ACCORD の炉心部伝熱計算モデルは、Fig. 4.2 に示すように燃料チャンネル 1 チャンネル分をモデル化している。1 チャンネル分の黒鉛ブロックの体積として、燃料カラム 30 カラムと、燃料領域内に配置されている制御棒案内カラム 7 カラムの合計 37 カラム分の黒鉛体積を全燃料チャンネル数 (954 本) で除したものを使用している。

ここでは、1 チャンネルあたりに割り当てる黒鉛の量を以下のように変更した場合の解析を実施した。

- ・ 30 カラム (燃料カラムのみ)
- ・ 61 カラム (燃料カラム + 制御棒案内カラム + 可動反射体カラム)

原子炉の解析結果を Fig. 5.3 に示す。黒鉛の熱容量を変化させても出力のピーク値は大きく変化しなかった。原子炉出力降下時の挙動はケースによって大きく異なっている。

(4)燃料コンパクトと黒鉛スリーブ間のギャップ幅

Fig. 4.2 に示す伝熱計算モデルにおいて、燃料コンパクトと黒鉛スリーブの間のギャップ幅は、製造時のノミナル値である 0.125mm を採用している。炉心温度が上昇すると、燃料コンパクトと黒鉛スリーブはほぼ同じように熱膨張するため、このギャップ幅はほとんど変化しないが、燃料コンパクトと黒鉛スリーブの製作公差を考慮する必要がある。この影響を評価するため、ギャップ幅を仮に 0.5 倍、1.5 倍と変化させた場合の結果を Fig. 5.4 に示す。ギャップ幅を大きくした場合、原子炉出力のピーク値は僅かに小さくなり、ギャップの熱伝達率が正の感度を有することが分かる。燃料の製造実績から、ギャップ幅のバラツキは、ノミナル寸法に対して約 0.8~1.7 倍の範囲となるため、これによる原子炉出力への影響は無視できない。

(5)冷却材流路の水力等価直径

黒鉛スリーブと黒鉛ブロック間の冷却材流路は、黒鉛スリーブの外側に設けられたスペーサ (Fig. 2.3) によって確保されているが、スペーサは黒鉛スリーブと冷却材との熱伝達率に影響を及ぼす。また、冷却材の流路幅については設計値を用いていることから、製作誤差などを考慮する必要があり、これも熱伝達率に影響を及ぼす因子である。これらの影響を評価するため、冷却材流路の水力等価直径を 0.5 倍、2.0 倍と変化させた。解析結果を Fig. 5.5 に示す。これらは、熱伝達率に換算すると、それぞれ 2 倍、0.5 倍と変化させた効果に相当する。水力等価直径を 2.0 倍としたケースでは、出力のピーク値が僅かに大きくなつたが、0.5 倍とした場合では基準ケースとの違いはほとんど生じなかった。燃料の製造実績から、本寸法のバラツキは 2%程度であるので、このパラメータの影響はほとんどない。

5. 2 核的パラメータに関する感度解析

(1)添加反応度

添加反応度については、MVP 計算の統計誤差である ±20% の範囲で変化させた結果を Fig. 5.6 に示す。原子炉出力のピーク値は大きく変化する。

(2)燃料温度係数

燃料温度係数の計算誤差は ±10% であるが、他のパラメータと影響の度合いを比較できるように ±20% 变化させた。解析結果は Fig. 5.7 にとおりであり、原子炉出力のピークや出力の低下挙動が大きく変化した。燃料温度係数を +20% (1.2 倍) としたケースでは、原子炉出力のピーク値は実測値とほぼ一致した。

(3)減速材温度係数

減速材温度係数の計算誤差は ±15% であるが、他のパラメータと影響の度合いを比較できるように ±20% 变化させた。解析結果は Fig. 5.8 にとおりであり、基準ケースとの違いはほとんど生じず、制御棒引抜きのような事象では感度が小さいことが分かった。

(4)即発中性子寿命

即発中性子寿命は、基準ケースでは $9.40 \times 10^{-4} \text{sec}$ としている。仮にこの値を 0.8 倍、

1.2 倍と変化させた場合の影響を評価した。解析結果は Fig. 5.9 に示すとおりであり、基準ケースとの違いはほとんどみられなかった。HTTR 炉心における即発中性子寿命のレベルでは、ランプ状反応度投入事象に対する影響は無視出来ることが分かった。

(5) 遅発中性子生成割合

遅発中性子生成割合は、基準ケースでは 0.65% としている。この値は、実際の炉心体系からの中性子の漏れの効果と燃焼日数の影響を考慮して求めた最確値であるが、HTTR 炉心での炉物理的な変化範囲を考慮して、この値を 0.8 倍、1.2 倍と変化させた場合の影響を評価した。解析結果は Fig. 5.10 に示すとおり大きく変化する。一方、遅発中性子割合に関する核データの不確かさは ±4% 程度とされており、制御棒引抜きに対する本パラメータの影響は無視できる。

5. 3 感度解析のまとめ

前項で示した各感度解析の結果を Table 5.1 にまとめる。本表では、パラメータを変化させた効果として、初期出力からの変化量の最大値（ピーク出力 - 初期出力）のノミナルケースに対する割合を示すものとし、各パラメータに想定される不確かさ幅を考慮した。また、各パラメータの不確かさの影響を大(○), 中(△), 小(×) の 3 段階で表わした。本評価で想定したパラメータの不確かさ幅では、原子炉出力に最も影響を与えるのは添加反応度であり、続いて燃料温度係数の順であった。

なお、減速材温度係数に対する感度は非常に小さかったが、本動特性解析では燃料温度係数の中にも減速材温度係数が暗に含まれており、今後、反応度係数の不確かさを論ずる時に、これをどのように取り扱うかを検討する必要がある。

また、ギャップコンダクタンスについては、ギャップ幅の変更によってその感度を見たが、過渡時の挙動を考慮できる解析モデルとなっているか検討が必要である。

Table 5.1 感度解析のまとめ

項目	感度評価時の パラメータ 変更幅	想定される 不確かさ幅	想定される不確かさ幅 でパラメータを変化 させた場合の効果*1	影響の 度合*2
燃料コンパクトの比熱	ノミナル×0.9	±5%	0.99～1.02	△
	ノミナル×1.1			
黒鉛スリーブの比熱	ノミナル×0.5	±5%	0.996～1.003	×
	ノミナル×2.0			
黒鉛ブロックの熱容量	30 カラム	—	0.99～1.02	△
	61 カラム			
燃料コンパクトと黒鉛スリーブ 間のギャップ幅	ノミナル×0.5	-30～+70%	0.97～1.04	○
	ノミナル×1.5			
冷却材流路の水力等価 直径	ノミナル×0.5	±1%	0.9998～1.0004	×
	ノミナル×2.0			
添加反応度	ノミナル×0.8	±20%	0.79～1.22	○
	ノミナル×1.2			
燃料温度係数	ノミナル×0.8	±10%	0.96～1.05	○
	ノミナル×1.2			
減速材温度係数	ノミナル×0.8	±15%	0.993～1.008	×
	ノミナル×1.2			
即発中性子寿命	ノミナル×0.8	—	1.00～1.00	×
	ノミナル×1.2			
遅発中性子生成割合	ノミナル×0.8	±4%	0.98～1.03	△
	ノミナル×1.2			

*1)初期出力からの変化量の最大値（ピーク出力－初期出力）のノミナルケースに対する比

*2) × : 解析結果への影響がほとんどない。

△ : 解析結果への影響はあるが小さい。

○ : 解析結果への影響が大きい。

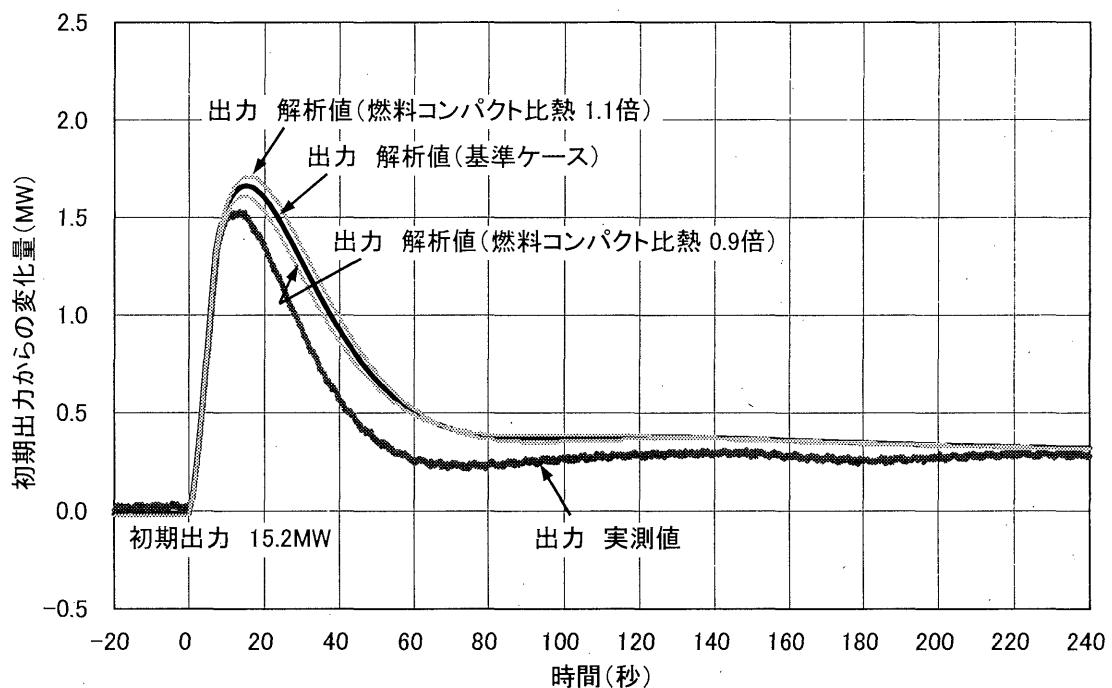


Fig. 5.1 燃料コンパクトの比熱に関する感度解析結果

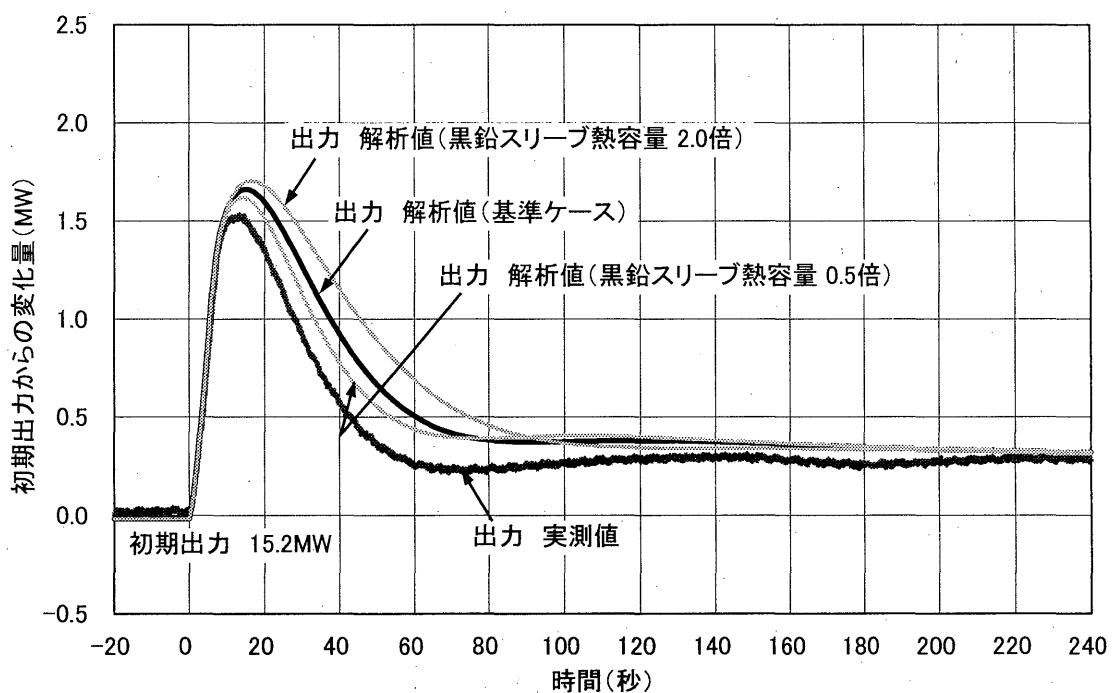


Fig. 5.2 黒鉛スリーブの比熱に関する感度解析結果

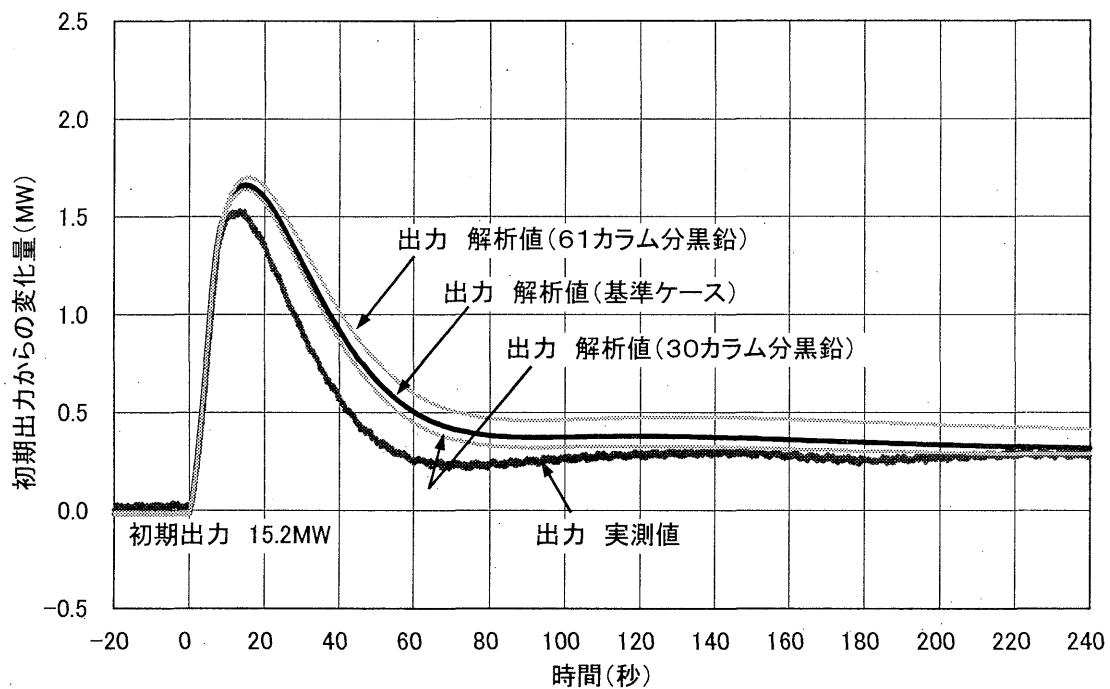


Fig. 5.3 黒鉛ブロックの熱容量に関する感度解析結果

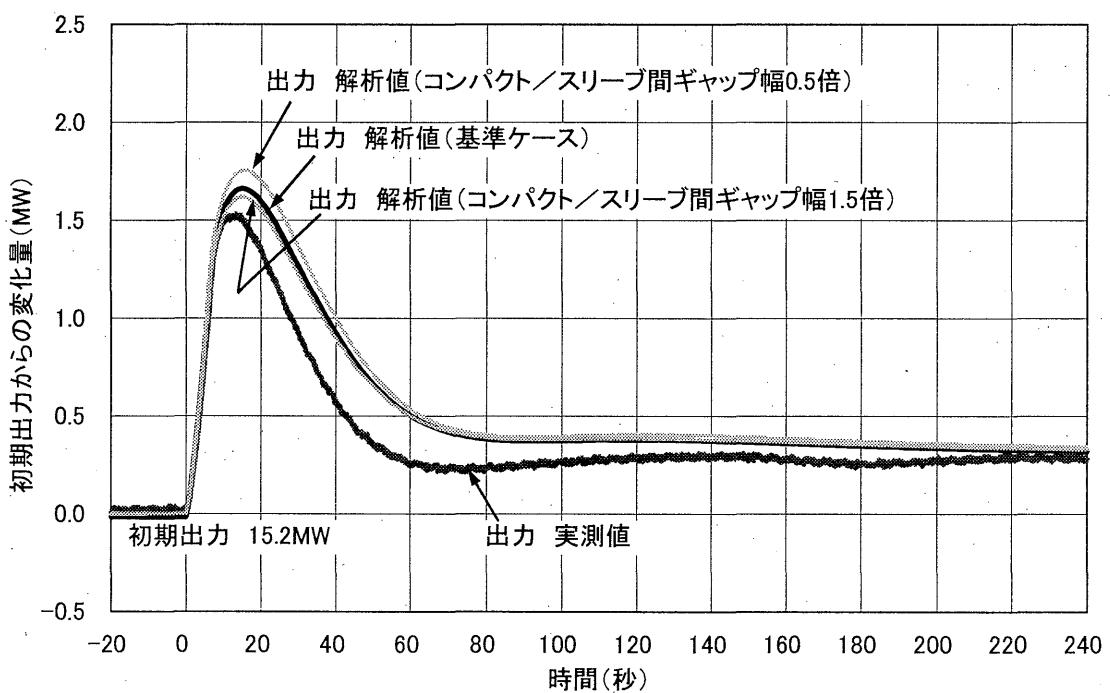


Fig. 5.4 燃料コンパクトと黒鉛スリーブ間のギャップ幅に関する感度解析結果

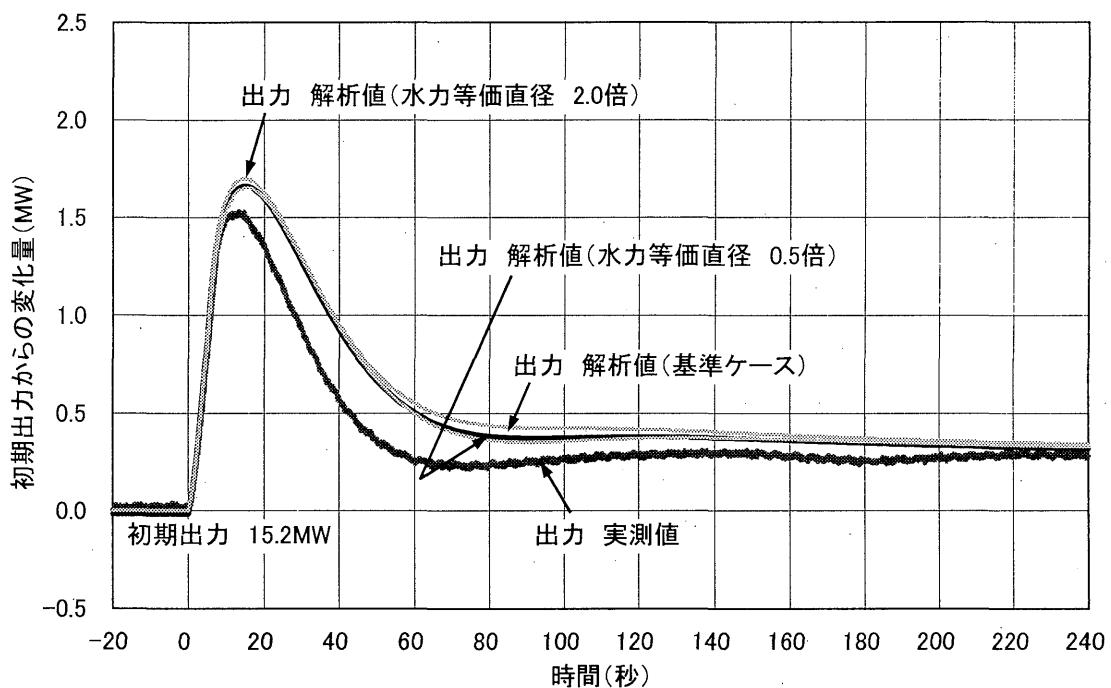


Fig. 5.5 冷却材流路の水力等価直径に関する感度解析結果

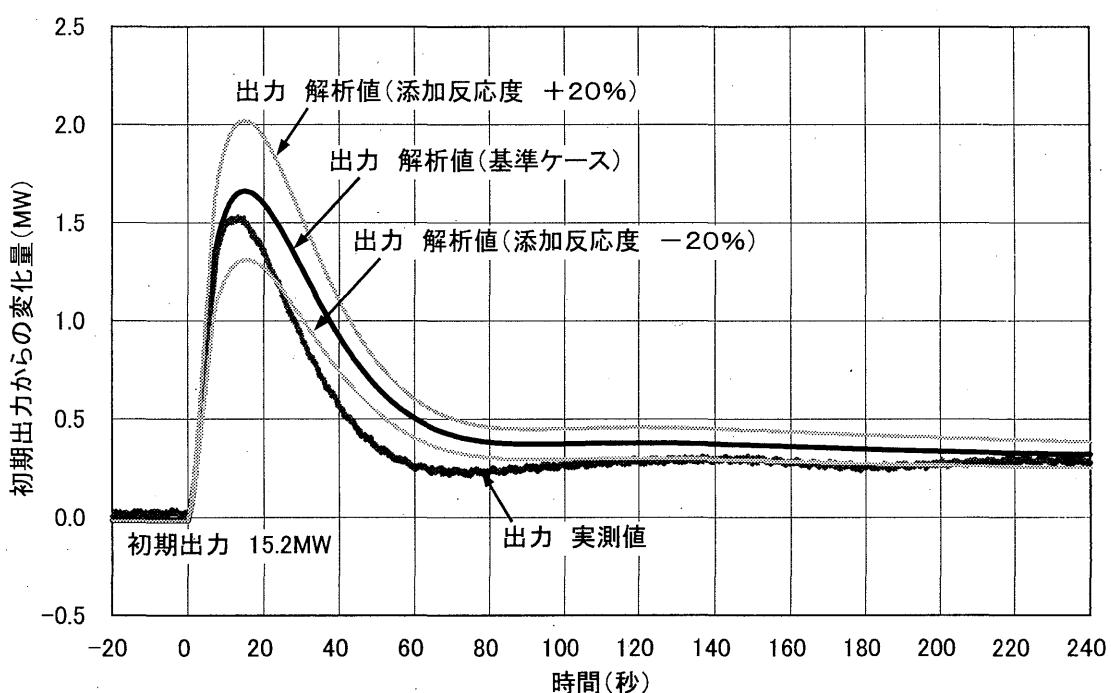


Fig. 5.6 添加反応度に関する感度解析結果

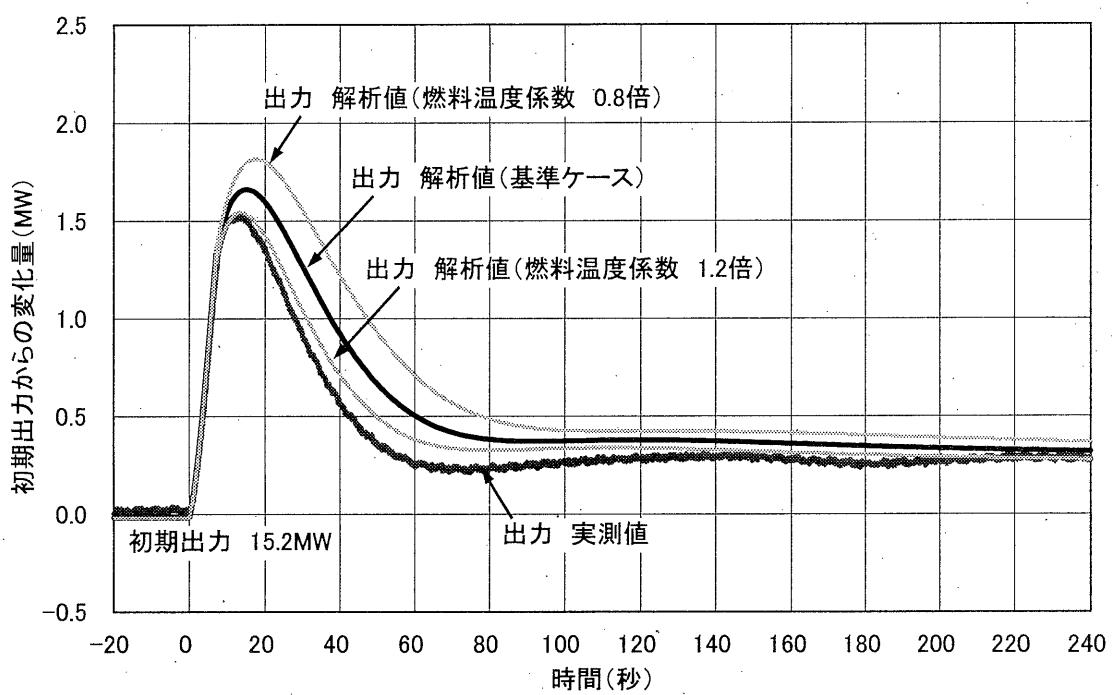


Fig. 5.7 燃料温度係数に関する感度解析結果

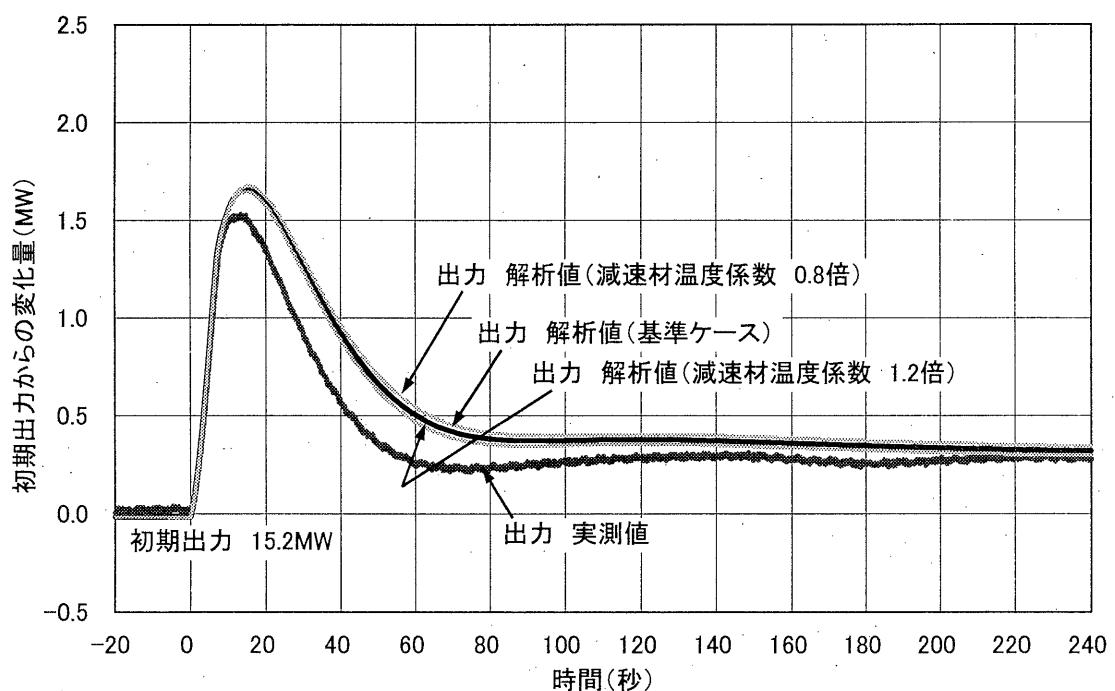


Fig. 5.8 減速材温度係数に関する感度解析結果

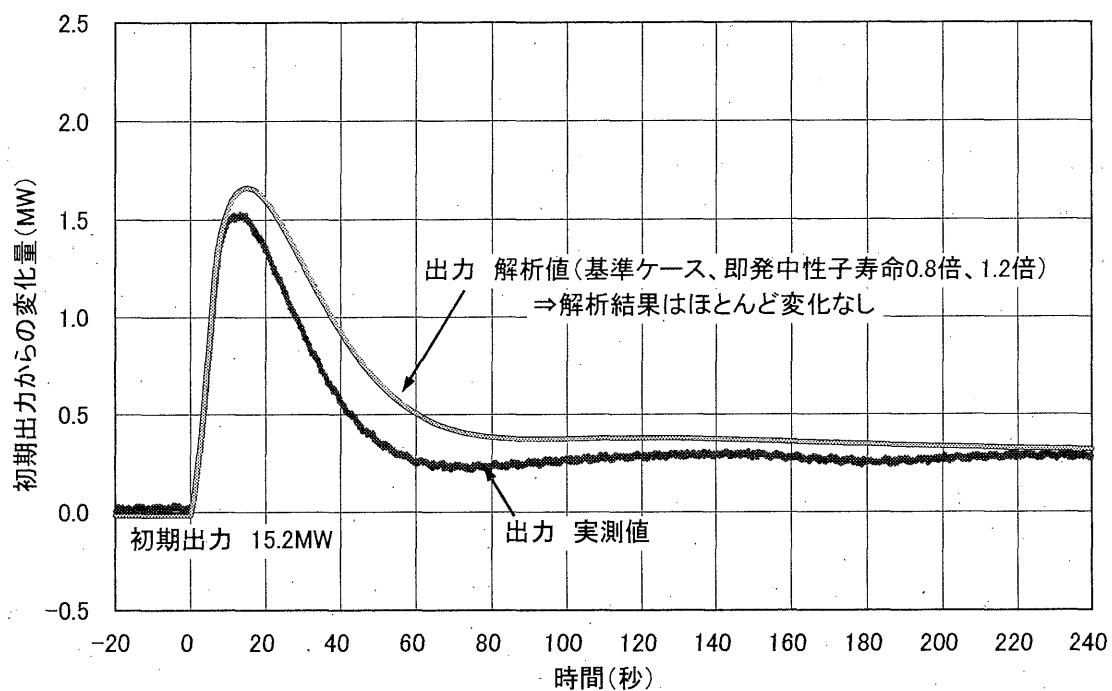


Fig. 5.9 即発中性子寿命に関する感度解析結果

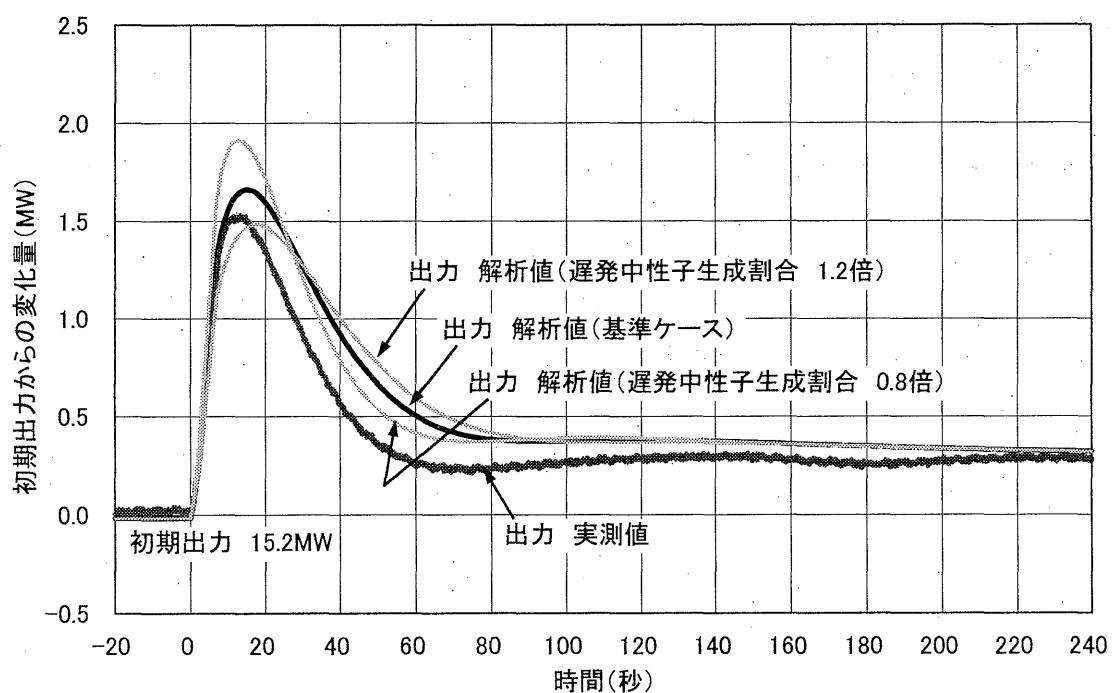


Fig. 5.10 遅発中性子生成割合に関する感度解析結果

6. 解析コードの改良方針

4章および付録に示した制御棒引抜き試験の動特性解析結果から、原子炉出力ピーク後の挙動が実測値を再現できていないのは、燃料および減速材の温度変化によって生じる反応度が良く再現できていないことが考えられる。これらの反応度は核計算によって求められた温度係数と、ACCORD コードの炉心部伝熱計算で求めた燃料および減速材の温度変化量によって決まるものである。これら 2 点に関して現状の問題点を整理し、解析コードの改良を進めていく予定である。

Table 6.1 に現状モデルの問題点と改良方針をまとめるとともに、コード改良の概念図を Fig. 6.1 に示す。

現状の解析では、各原子炉出力の温度状態に対して、炉心全体で燃料と減速材の温度係数をそれぞれ 1 点で設定している。高温ガス炉の場合、炉心の冷却材の流れ方向に大きな温度差 (HTTR で原子炉出力 30MW の運転を行うと、炉心入口は約 400°C、炉心出口は約 950°C) が生じるが、現状の解析では冷却材流れ方向の大きな温度差に対応した温度係数の違いを考慮することができない。このため、Fig. 6.1 に示すように、炉心を半径方向 4 分割、軸方向 5 分割の領域に分け、領域毎の温度係数を求めることとする。

ACCORD コードの炉心部伝熱計算モデルについては、炉心全体で 954 本存在する燃料チャンネルを 1 本のチャンネルで代表させている。このため、炉心半径方向の出力分布や冷却材流量配分に起因する温度分布を考慮することができない。このため、対象とする燃料チャンネルを 4 本まで設定し、これらに異なった出力分布と冷却材流量を割り当てることにより、温度分布をより正確に再現できるように改良を加える。

燃料や減速材の温度変化によって生じる反応度の計算においては、領域毎の温度係数と 4 チャンネルそれぞれの伝熱計算モデルで計算された温度変化を用いることにより、領域毎に求められるように改良を行なう。

さらに、4 チャンネルで定義した伝熱計算モデルのチャンネル間については、炉心の半径方向温度分布による横方向の熱移動を模擬できるように改良を加える。

Table 6.1 動特性解析における問題点と改良方針

項目	現状モデル	問題点	改良方針
温度係数	ある出力状態に対して、炉心全体で1つの温度係数を設定している。	冷却材の流れ方向の大きな温度変化に対して、温度係数の変化を考慮できない。	炉心を半径方向に4分割、軸方向5分割の温度係数（ある出力状態に対して20点）を使用する。
炉心部伝熱計算モデル	炉心全体を1チャンネル（軸方向は10分割）で代表させている。	半径方向の出力分布、流量配分によって生じる温度分布を考慮することができない。	4チャンネルモデルとし、出力分布、流量配分の効果を考慮できるようにする。（但し、チャンネル間の熱移動は考慮できない）
燃料(減速材)温度変化による反応度	1つの温度係数と燃料部(減速材部)全体を体積平均した温度の変化から算出している。	冷却材の流れ方向の大きな温度変化に対して、温度係数の変化を考慮できない。	半径方向4分割、軸方向10分割（温度係数は5分割）の要素毎の温度係数と温度変化に基づき計算する。
炉心部伝熱計算モデル	ステップ1のモデルでは、チャンネル間の熱移動が考慮されない。	炉心の半径方向の熱逃げを考慮することができない。	4つのチャンネル間で熱の移動が考慮できるようモデルを改良する。

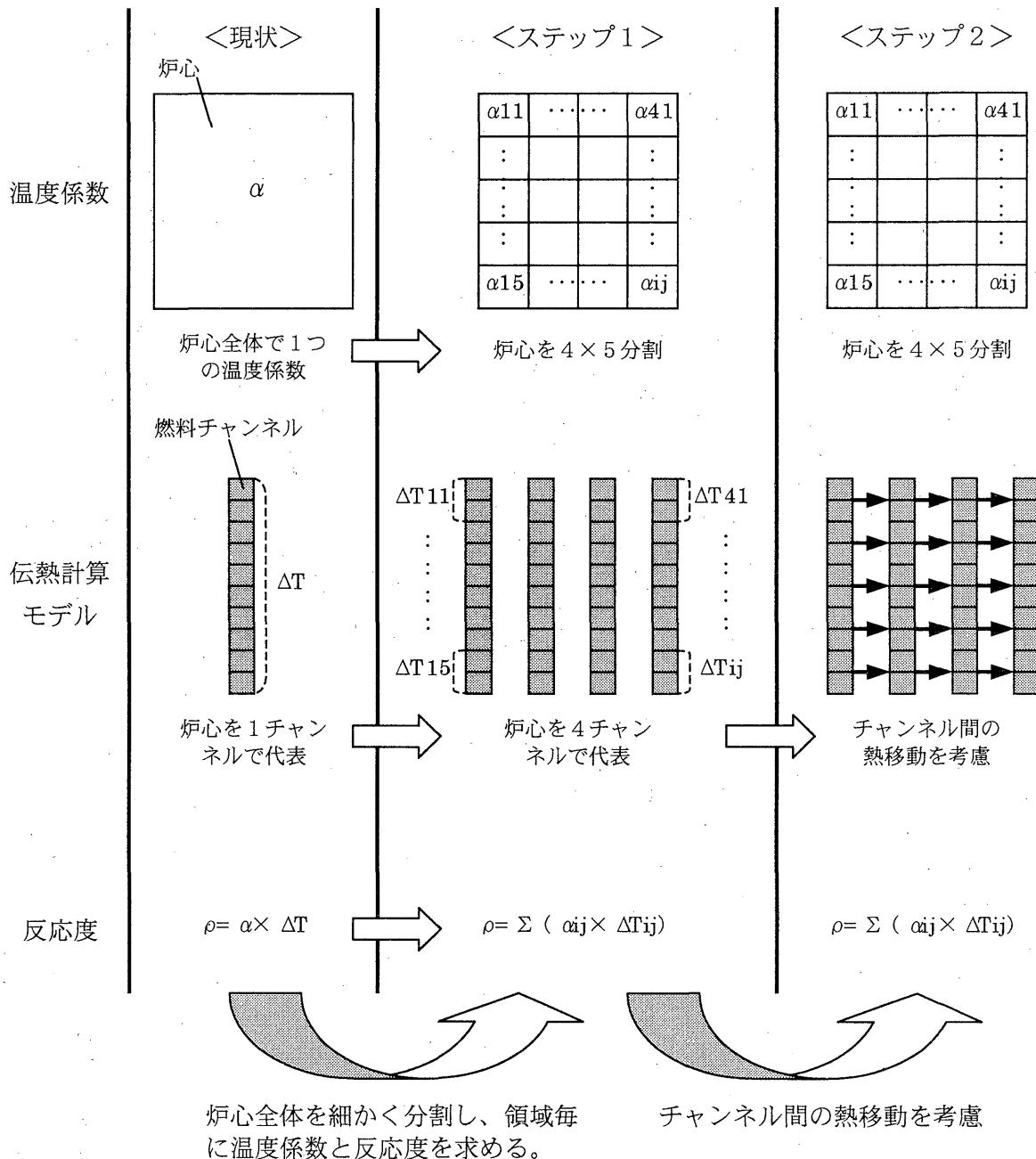


Fig. 6.1 ACCORD コード改良のイメージ

7.まとめ

高温工学試験研究炉（HTTR）を用いて実施している安全性実証試験のうち、制御棒引抜き試験について、プラント動特性解析コード（ACCORD コード）を用いて動特性解析を実施し、以下のことを確認した。

－制御棒引抜き後の原子炉出力の上昇幅は、実測値に比べて解析値の方が大きめとなっているものの、出力変化に大きな矛盾はなく、ほぼ実測値を再現できた。

－解析結果から反応度の内訳をみると、原子炉出力の最大値を含む全体の挙動は、ほぼ燃料温度変化による反応度に支配されている。

また、解析条件としている主なパラメータについて感度解析を実施し、熱的なパラメータと核的なパラメータについて解析結果への影響の度合いを明らかにした。

解析結果と実測値のずれについては、各パラメータの不確かさ幅、モデルを再度分析する他、流量減少型事象における感度解析等を総合して、矛盾のないパラメータ、モデルの調整を目指す予定である。また、ACCORD コードの炉心部伝熱計算と反応度計算において、炉心を半径方向と軸方向とに分割したモデルを採用することとし、改良を進めている最中である。

謝 辞

制御棒引抜き試験の実施にあたり、原子炉の運転と試験時のプラント操作を実施くださった HTTR 試験室の皆様に深く感謝いたします。また、動特性解析を進めるにあたり、多大な助言をくださった安全性実証試験専門部会のメンバーの皆様、さらに本レポートをまとめるにあたって貴重なコメントを下さいました安濃田 原子炉安全工学部次長、藤川 高温工学試験研究炉開発部長、林次長、伊与久次長に感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 日本原子力研究所: 日本原子力研究所大洗研究所原子炉設置変更許可申請書 [HTTR（高温工学試験研究炉）原子炉施設の設置] , (1989).
- (2) 藤川、伊与久、他: 日本原子力学会和文誌, 1(4), 361 (2002).
- (3) 橋幸男、中川繁昭他, JAERI-Tech 2002-059, “高温工学試験研究炉(HTTR)の安全性実証試験計画” , (2002).
- (4) 竹田武司、橋幸男他, JAERI-Data/Code 96-032, “高温ガス炉用プラント動特性コード‘ACCORD’の開発” , (1996).
- (5) 中川繁昭、三竹晋他, JAERI-M 1989-013, “高温ガス炉の炉心動特性解析コード”BLOOST-J2”” , (1989).
- (6) 中川繁昭、坂場成昭他, JAERI-Tech 2003-049, “HTTR 安全性実証試験 (SR-1/S1C-1) の試験計画 (受託事業) ”, (2003)

This is a blank page.

付 錄

全試験ケースの解析条件と解析結果

This is a blank page.

試験ケース：9MW-1

Table A1-1 動特性解析条件

項目	解析条件
初期原子炉出力 (MW)	8.9
制御棒引抜き量 (mm)	21
制御棒引抜き速度 (mm/sec)	1.47
添加反応度 (%Δk/k)	0.023
燃料温度係数 ($\Delta k/k/^\circ C$)	-5.0×10^{-5}
減速材温度係数 ($\Delta k/k/^\circ C$)	-5.3×10^{-5}
遅発中性子割合 (%)	0.65
即発中性子寿命 (sec)	9.4×10^{-4}

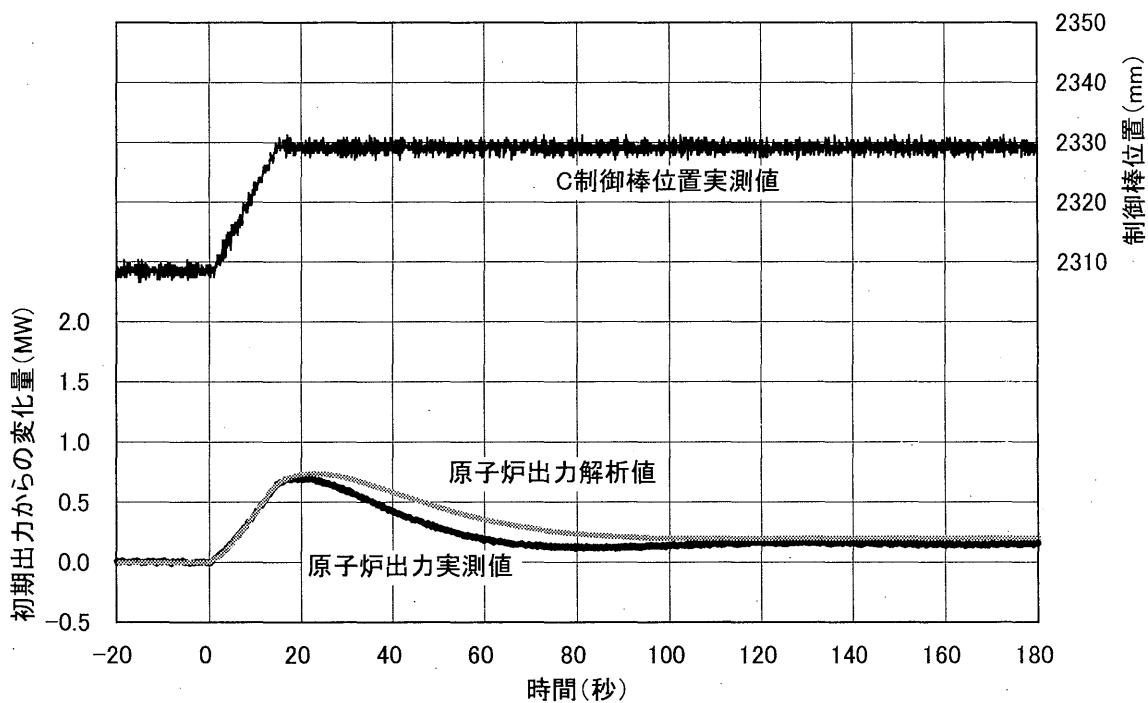


Fig. A1-1 制御棒引抜き試験の動特性解析結果 試験ケース：9MW-1 (原子炉出力変化)

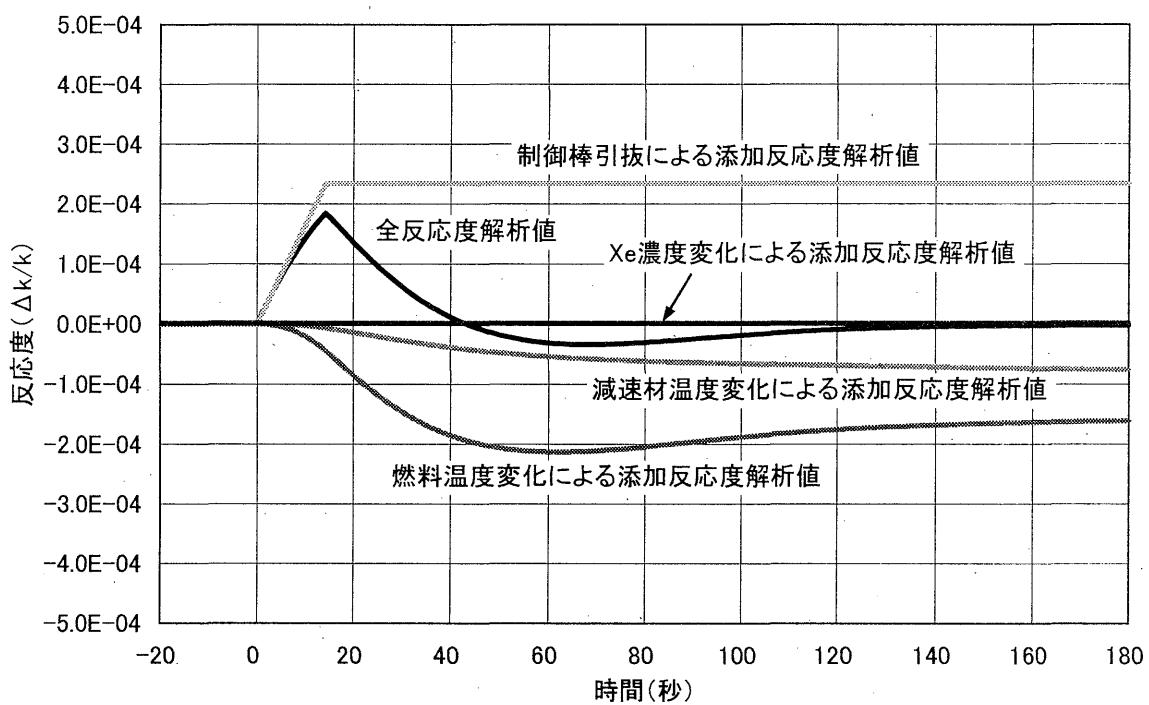


Fig. A1-2 制御棒引抜き試験の動特性解析結果 試験ケース：9MW-1（反応度変化）

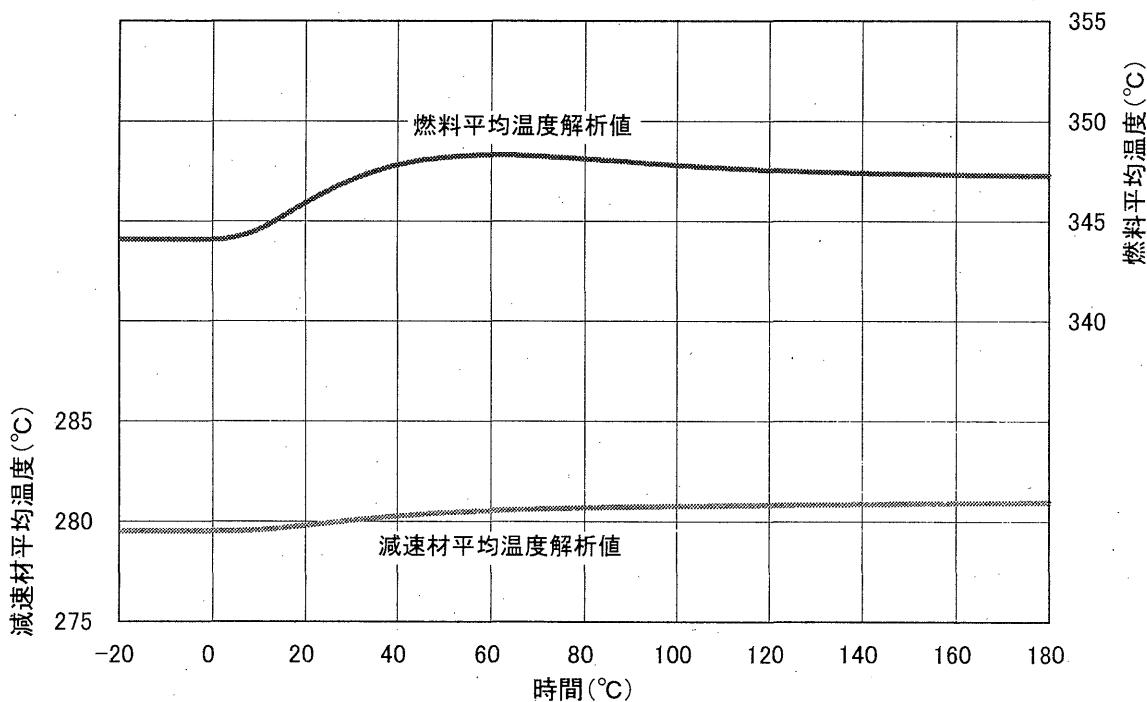


Fig. A1-3 制御棒引抜き試験の動特性解析結果 試験ケース：9MW-1（燃料及び減速材温度変化）

試験ケース：9MW-2

Table A2-1 動特性解析条件

項目	解析条件
初期原子炉出力 (MW)	9.0
制御棒引抜き量 (mm)	41
制御棒引抜き速度 (mm/sec)	1.48
添加反応度 (%Δk/k)	0.046
燃料温度係数 ($\Delta k/k/^\circ C$)	-5.0×10^{-5}
減速材温度係数 ($\Delta k/k/^\circ C$)	-5.3×10^{-5}
遅発中性子割合 (%)	0.65
即発中性子寿命 (sec)	9.4×10^{-4}

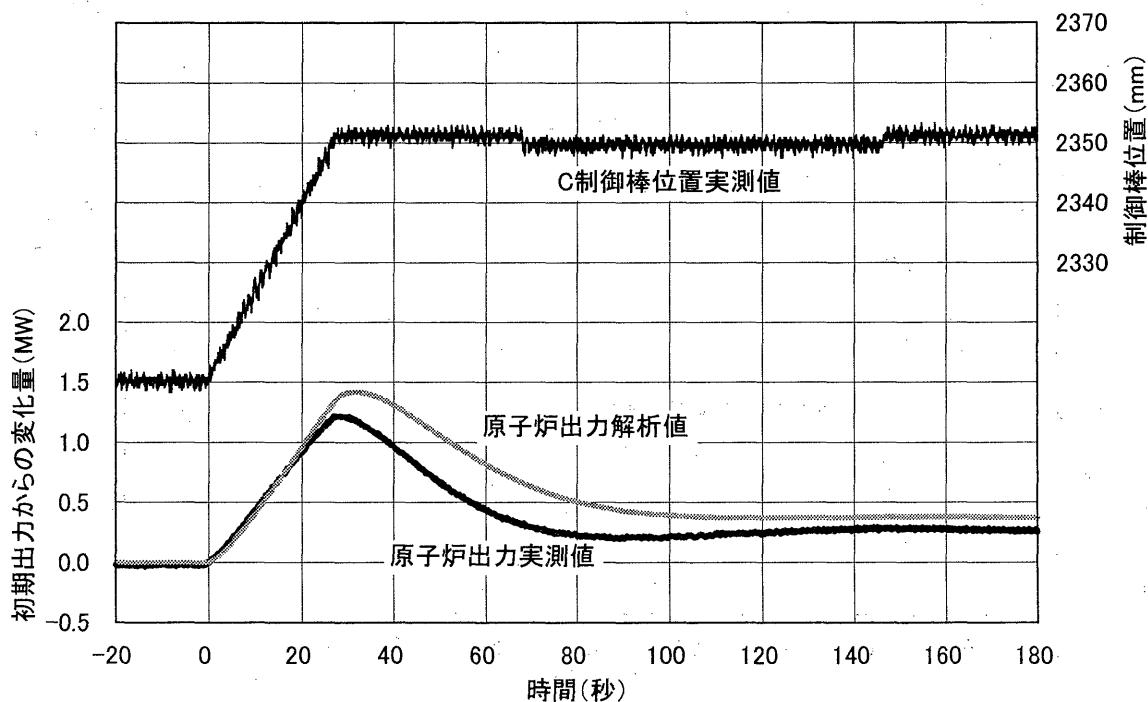


Fig. A2-1 制御棒引抜き試験の動特性解析結果 試験ケース：9MW-2 (原子炉出力変化)

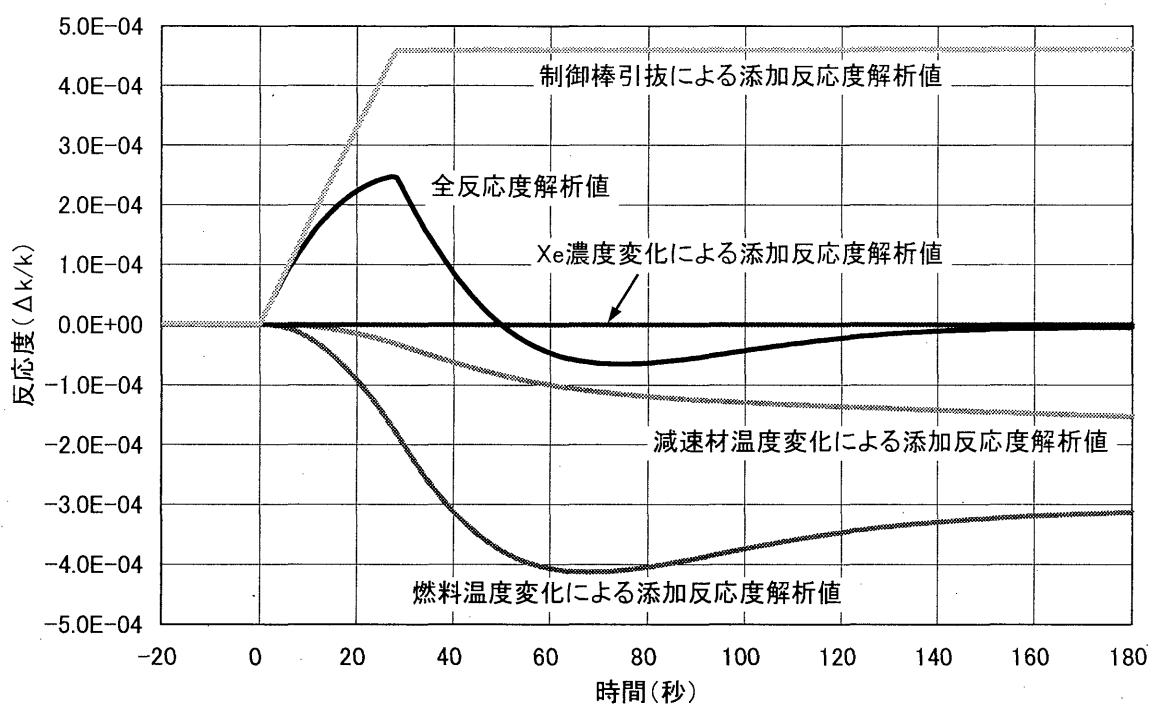


Fig. A2-2 制御棒引抜き試験の動特性解析結果 試験ケース：9MW-2（反応度変化）

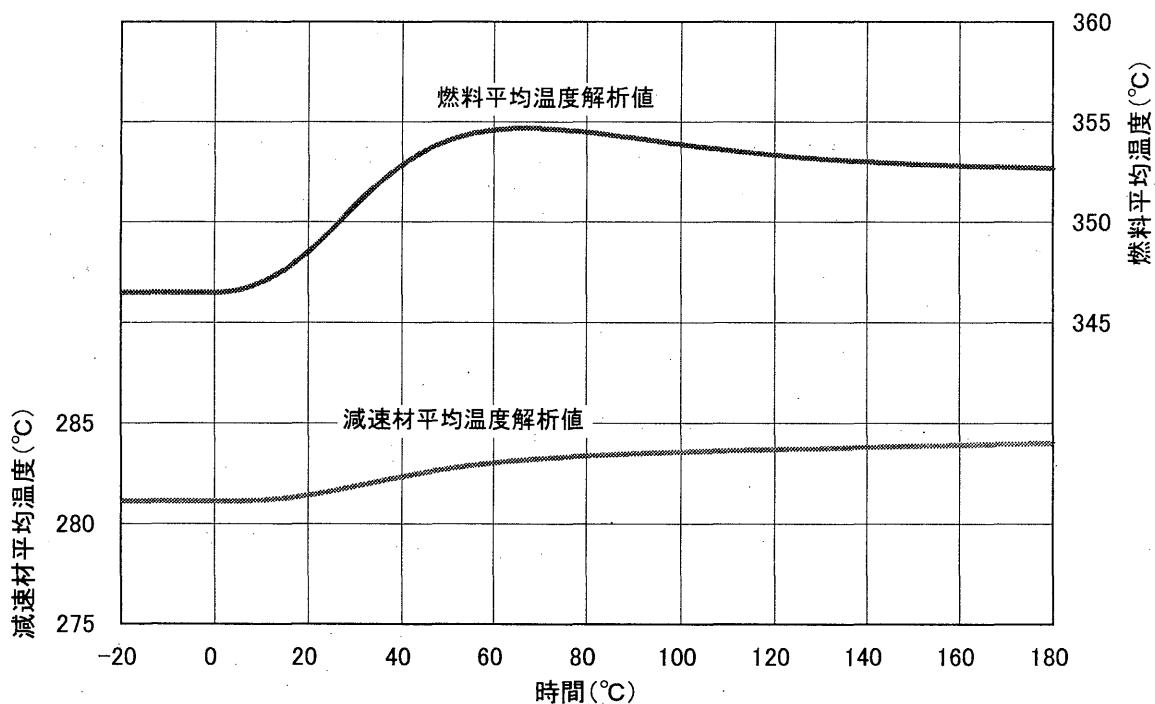


Fig. A2-3 制御棒引抜き試験の動特性解析結果 試験ケース：9MW-2（燃料及び減速材温度変化）

試験ケース：9MW-3

Table A3-1 動特性解析条件

項目	解析条件
初期原子炉出力 (MW)	9.1
制御棒引抜き量 (mm)	24
制御棒引抜き速度 (mm/sec)	4.64
添加反応度 (%Δk/k)	0.027
燃料温度係数 (Δk/k/°C)	-5.0 × 10 ⁻⁵
減速材温度係数 (Δk/k/°C)	-5.3 × 10 ⁻⁵
遅発中性子割合 (%)	0.65
即発中性子寿命 (sec)	9.4 × 10 ⁻⁴

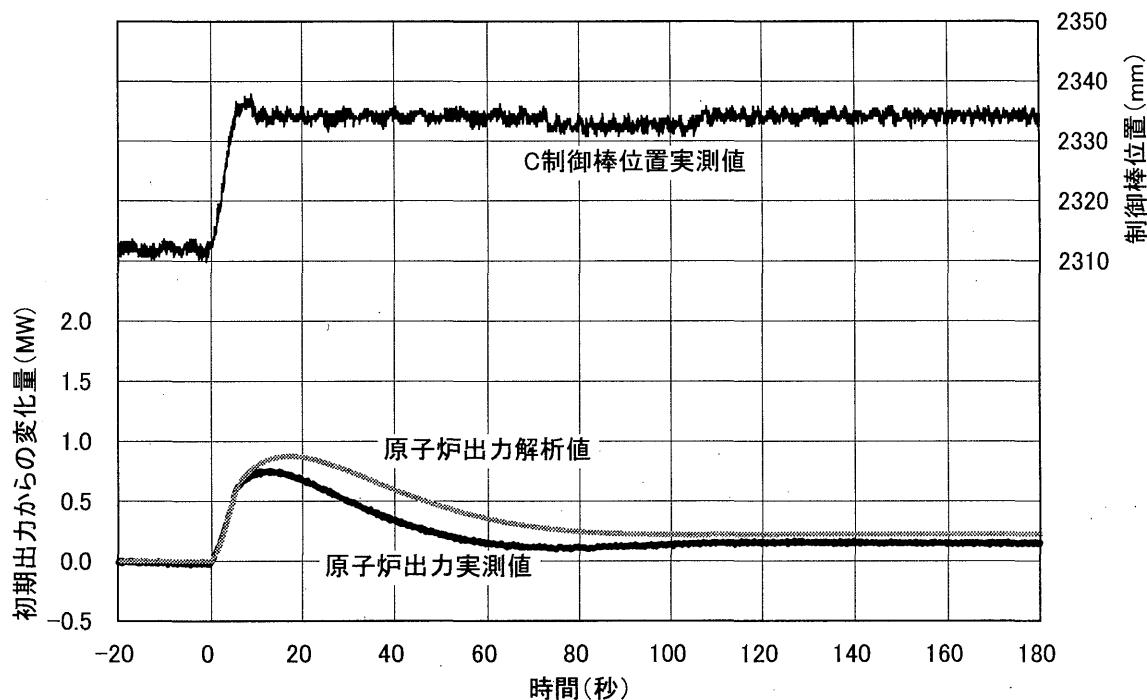


Fig. A3-1 制御棒引抜き試験の動特性解析結果 試験ケース：9MW-3 (原子炉出力変化)

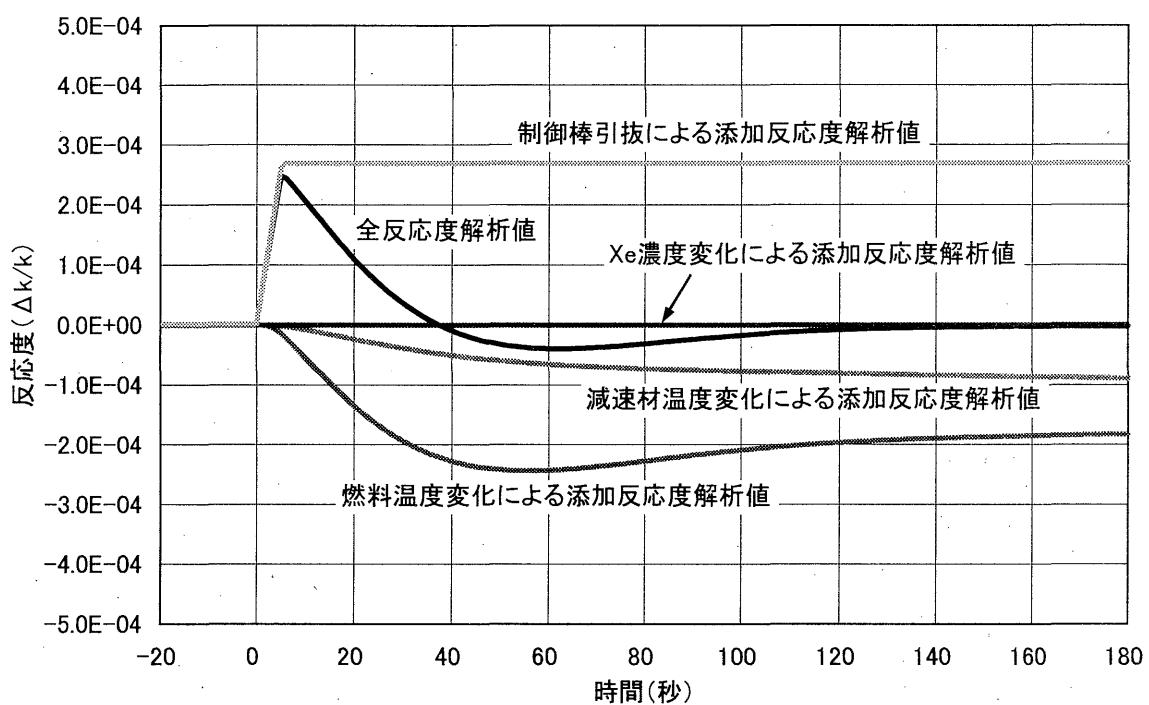


Fig. A3-2 制御棒引抜き試験の動特性解析結果 試験ケース：9MW-3（反応度変化）

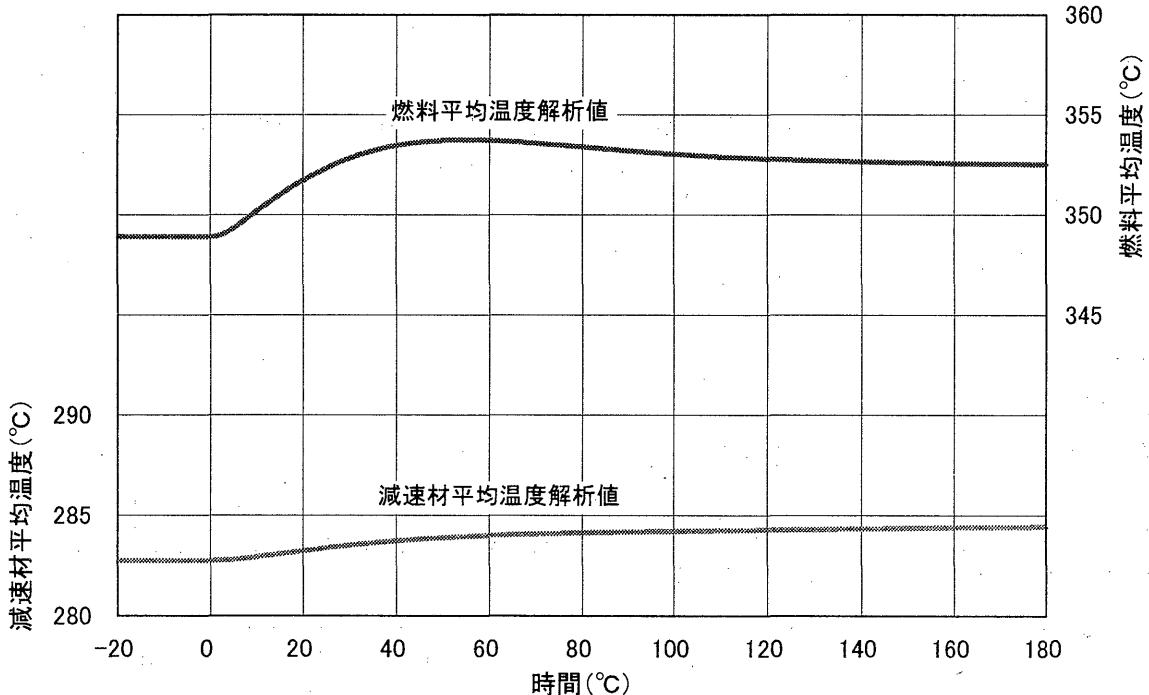


Fig. A3-3 制御棒引抜き試験の動特性解析結果 試験ケース：9MW-3（燃料及び減速材温度変化）

試験ケース：9MW-4

Table A4-1 動特性解析条件

項目	解析条件
初期原子炉出力 (MW)	9.1
制御棒引抜き量 (mm)	41
制御棒引抜き速度 (mm/sec)	4.45
添加反応度 (%Δk/k)	0.046
燃料温度係数 ($\Delta k/k/^\circ C$)	-5.0×10^{-5}
減速材温度係数 ($\Delta k/k/^\circ C$)	-5.3×10^{-5}
遅発中性子割合 (%)	0.65
即発中性子寿命 (sec)	9.4×10^{-4}

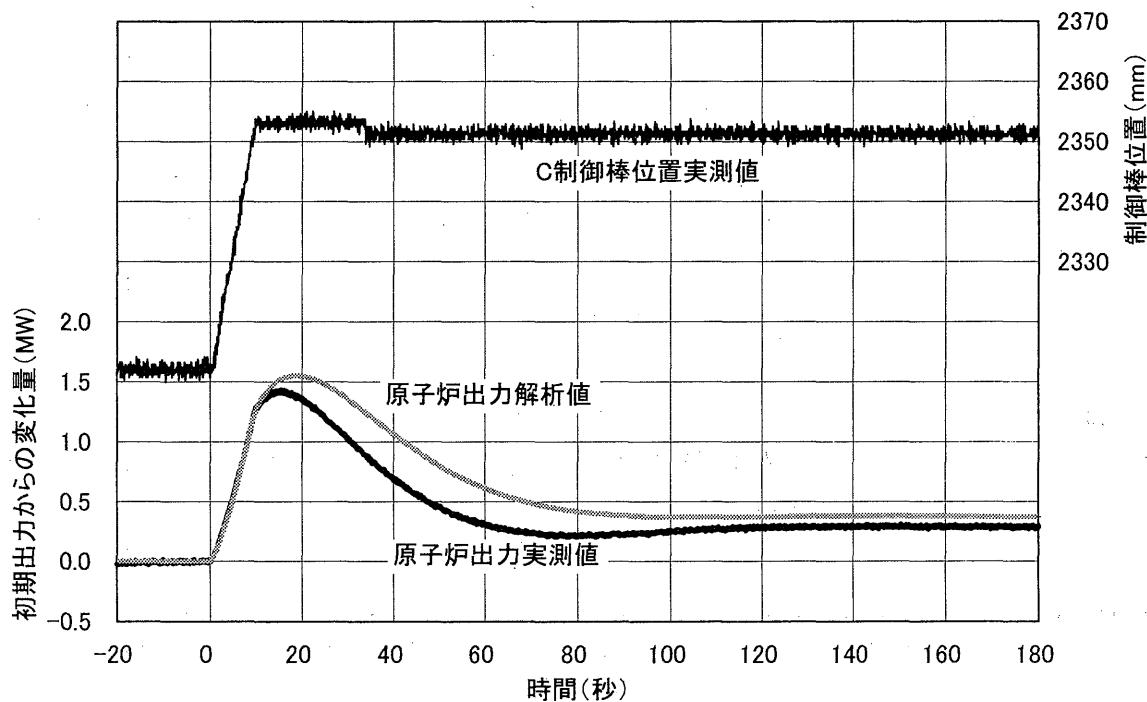


Fig. A4-1 制御棒引抜き試験の動特性解析結果 試験ケース：9MW-4 (原子炉出力変化)

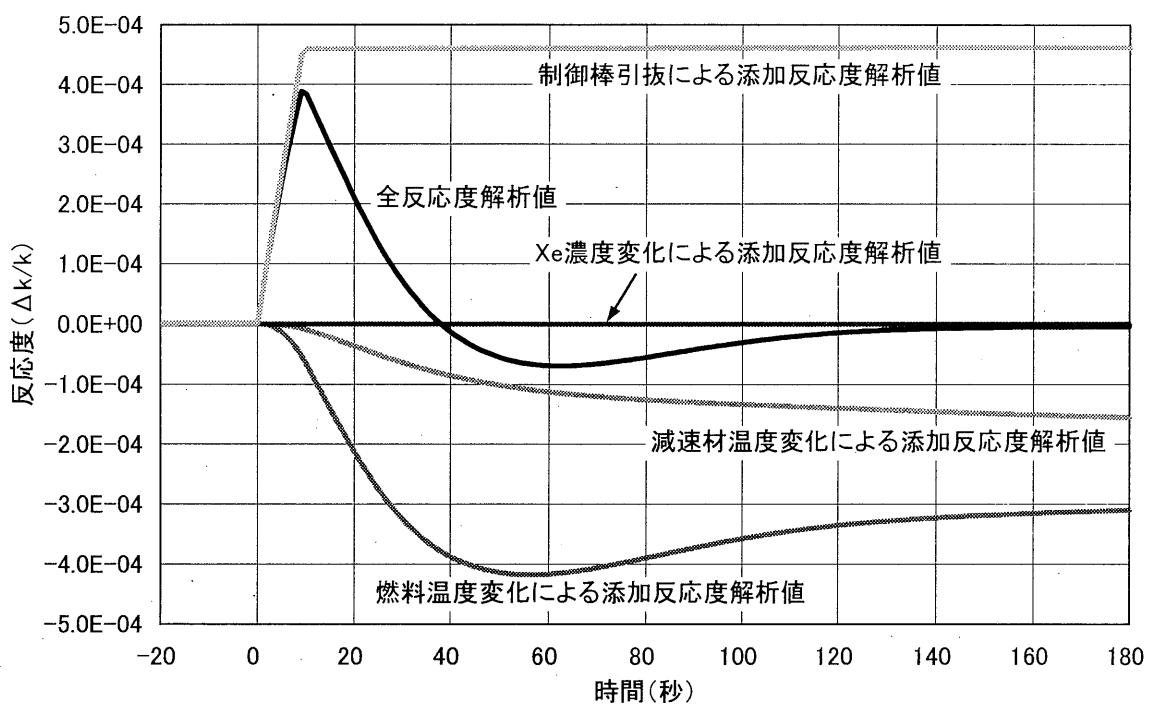


Fig. A4-2 制御棒引抜き試験の動特性解析結果 試験ケース：9MW-4（反応度変化）

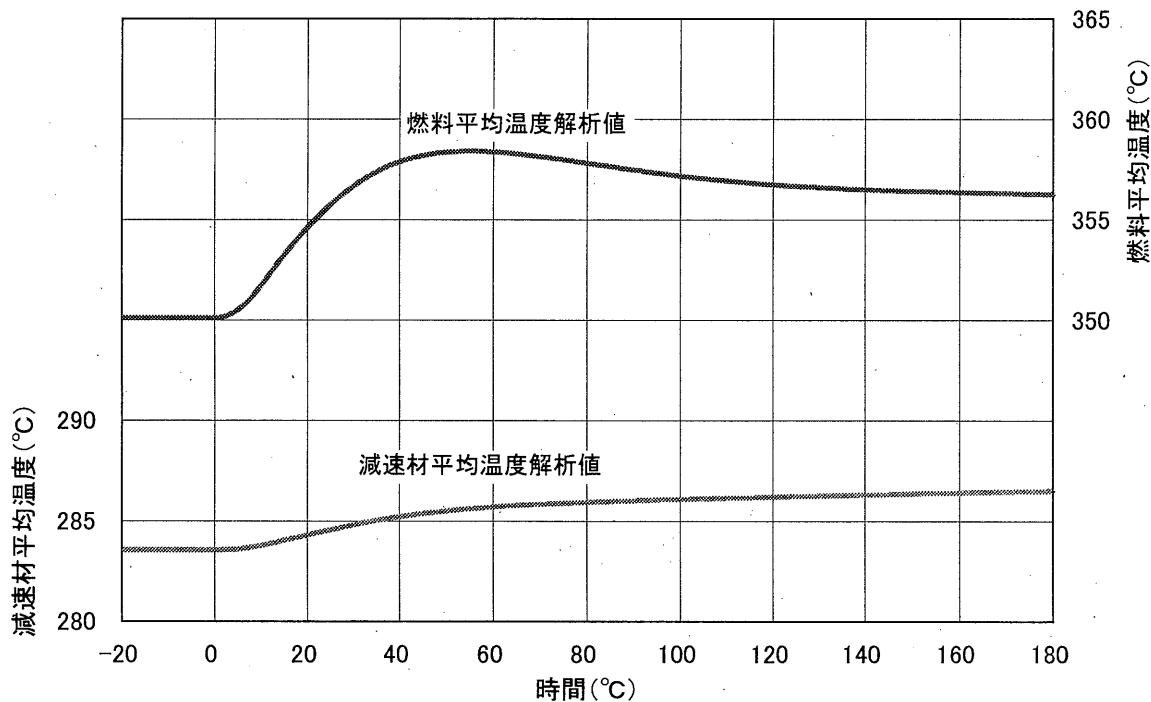


Fig. A4-3 制御棒引抜き試験の動特性解析結果 試験ケース：9MW-4（燃料及び減速材温度変化）

試験ケース：15MW-1

Table A5-1 動特性解析条件

項目	解析条件
初期原子炉出力 (MW)	15.3
制御棒引抜き量 (mm)	21
制御棒引抜き速度 (mm/sec)	1.47
添加反応度 (%Δk/k)	0.024
燃料温度係数 (Δk/k/°C)	-4.5 × 10 ⁻⁵
減速材温度係数 (Δk/k/°C)	-3.1 × 10 ⁻⁵
遅発中性子割合 (%)	0.65
即発中性子寿命 (sec)	9.4 × 10 ⁻⁴

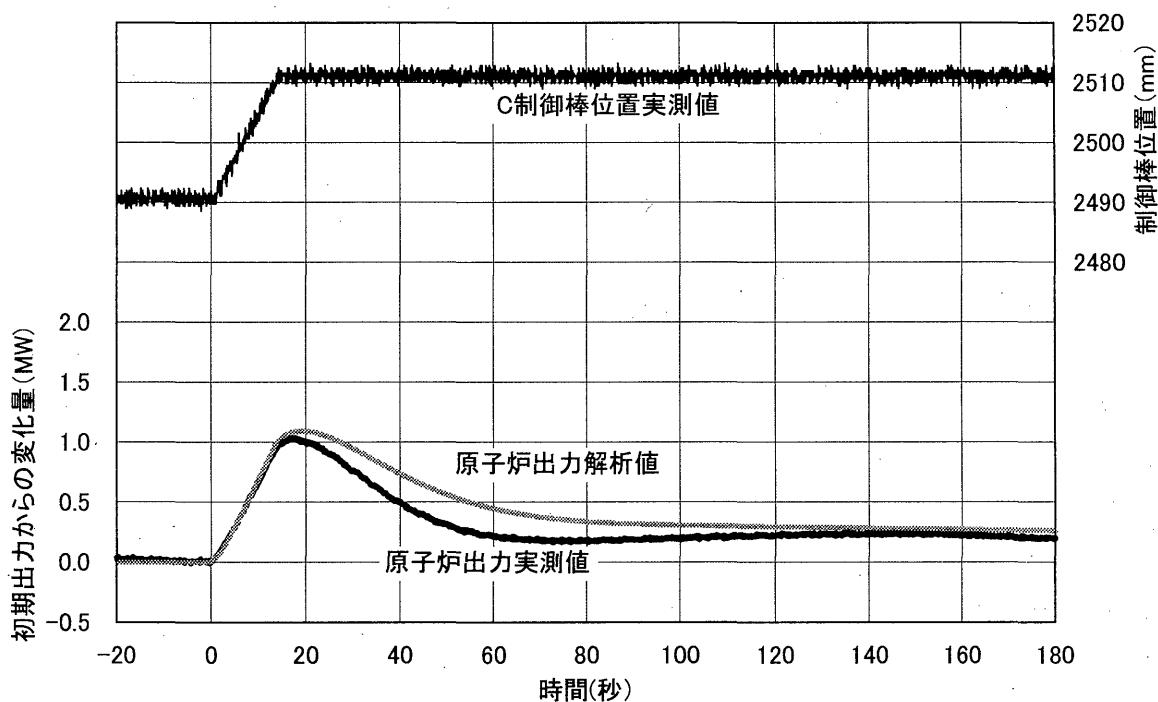


Fig. A5-1 制御棒引抜き試験の動特性解析結果 試験ケース：15MW-1（原子炉出力変化）

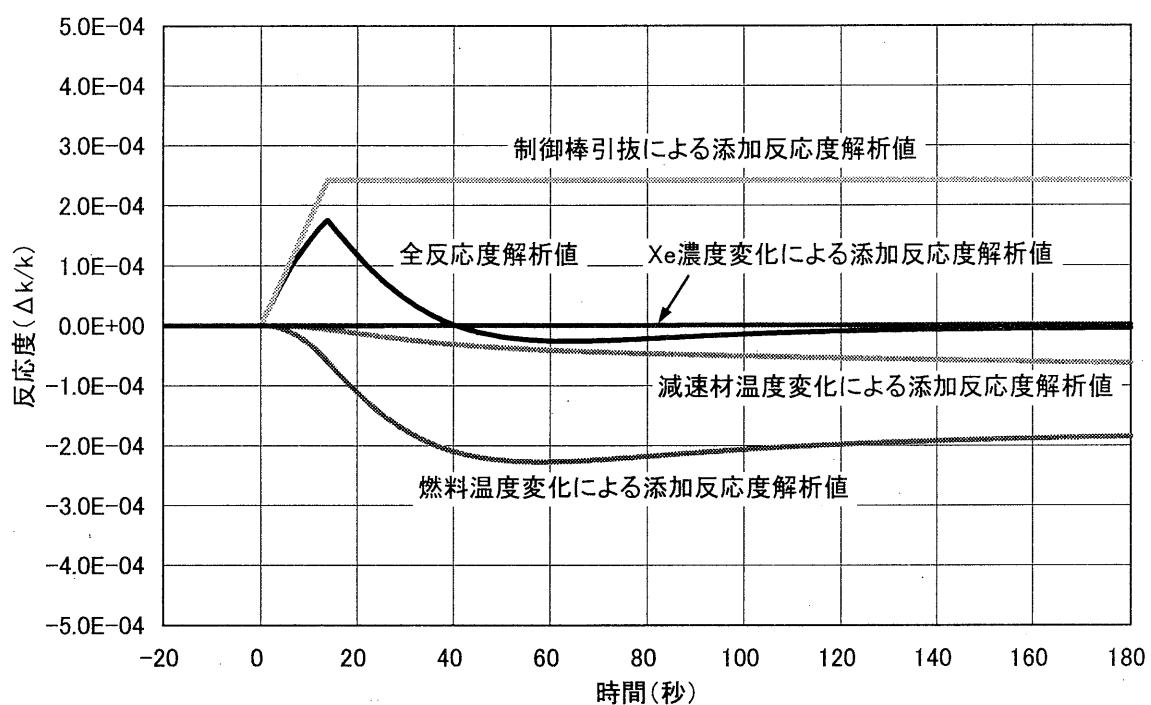


Fig. A5-2 制御棒引抜き試験の動特性解析結果 試験ケース：15MW-1（反応度変化）

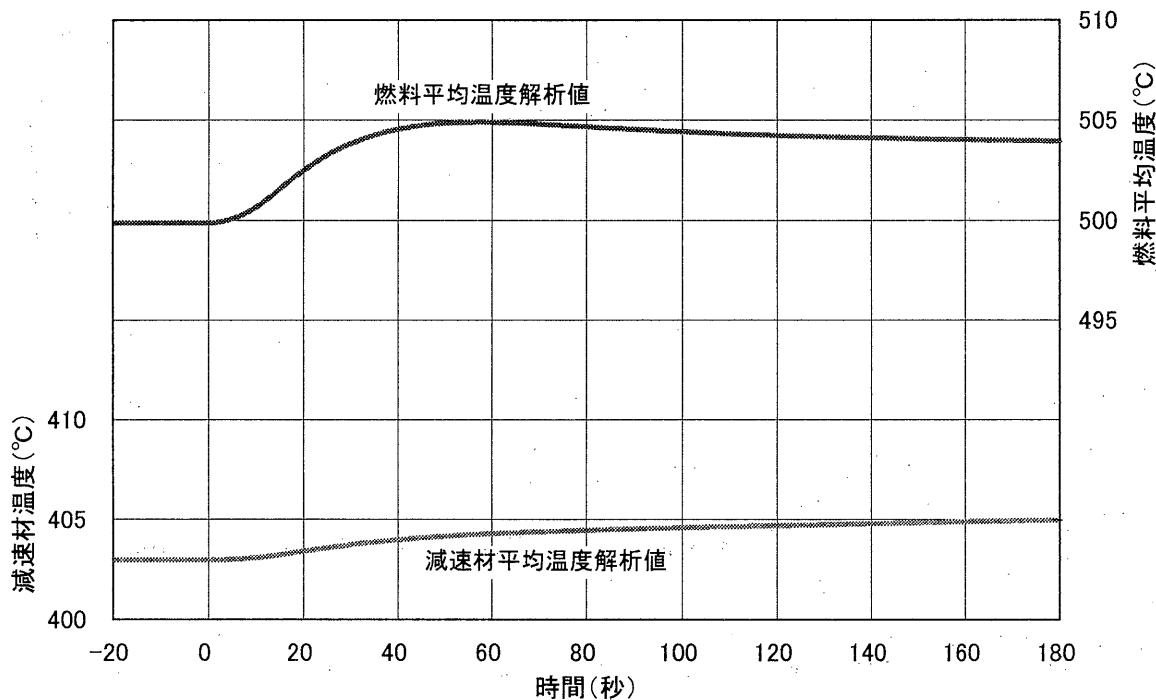


Fig. A5-3 制御棒引抜き試験の動特性解析結果 試験ケース：15MW-1（燃料及び減速材温度変化）

試験ケース：15MW-2

Table A6-1 動特性解析条件

項目	解析条件
初期原子炉出力 (MW)	15.3
制御棒引抜き量 (mm)	31
制御棒引抜き速度 (mm/sec)	1.47
添加反応度 (%Δk/k)	0.036
燃料温度係数 (Δk/k/°C)	-4.5 × 10 ⁻⁵
減速材温度係数 (Δk/k/°C)	-3.1 × 10 ⁻⁵
遅発中性子割合 (%)	0.65
即発中性子寿命 (sec)	9.4 × 10 ⁻⁴

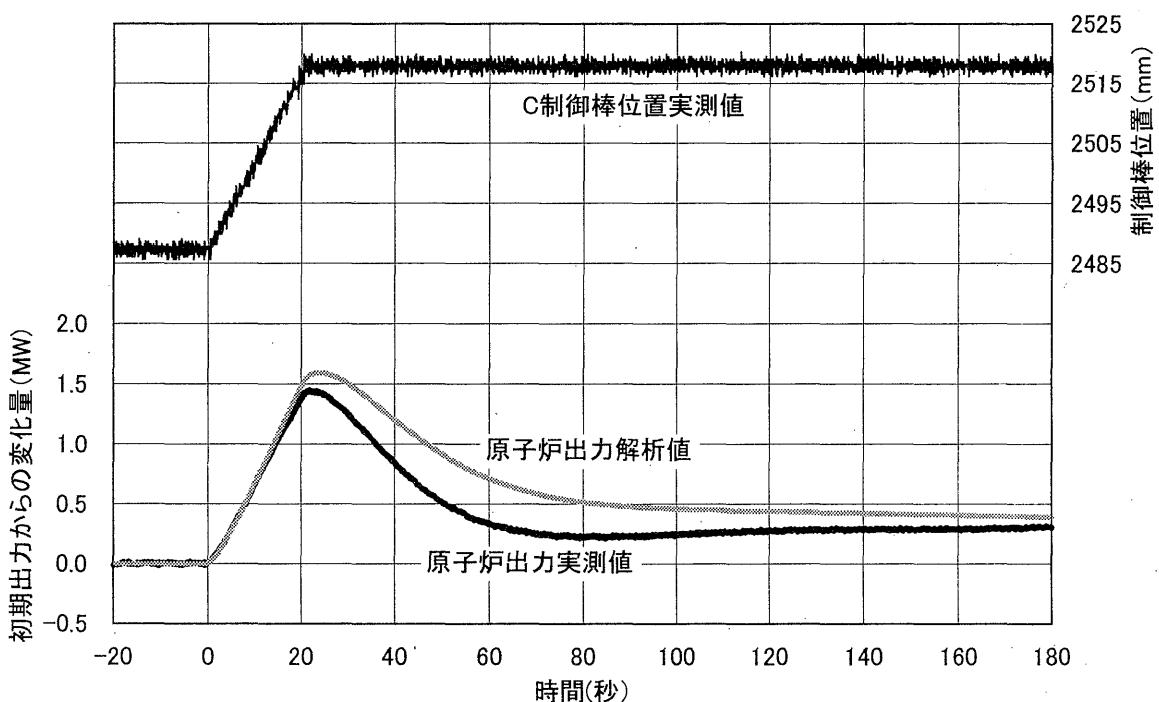


Fig. A6-1 制御棒引抜き試験の動特性解析結果 試験ケース：15MW-2 (原子炉出力変化)

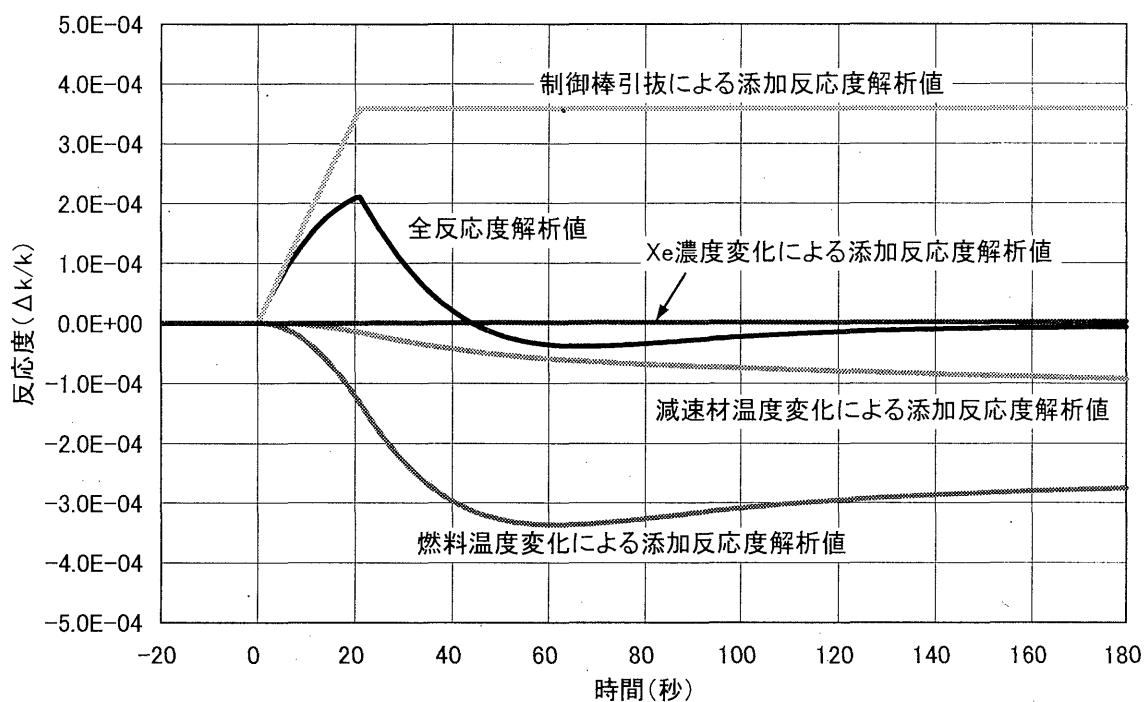


Fig. A6-2 制御棒引抜き試験の動特性解析結果 試験ケース：15MW-2（反応度変化）

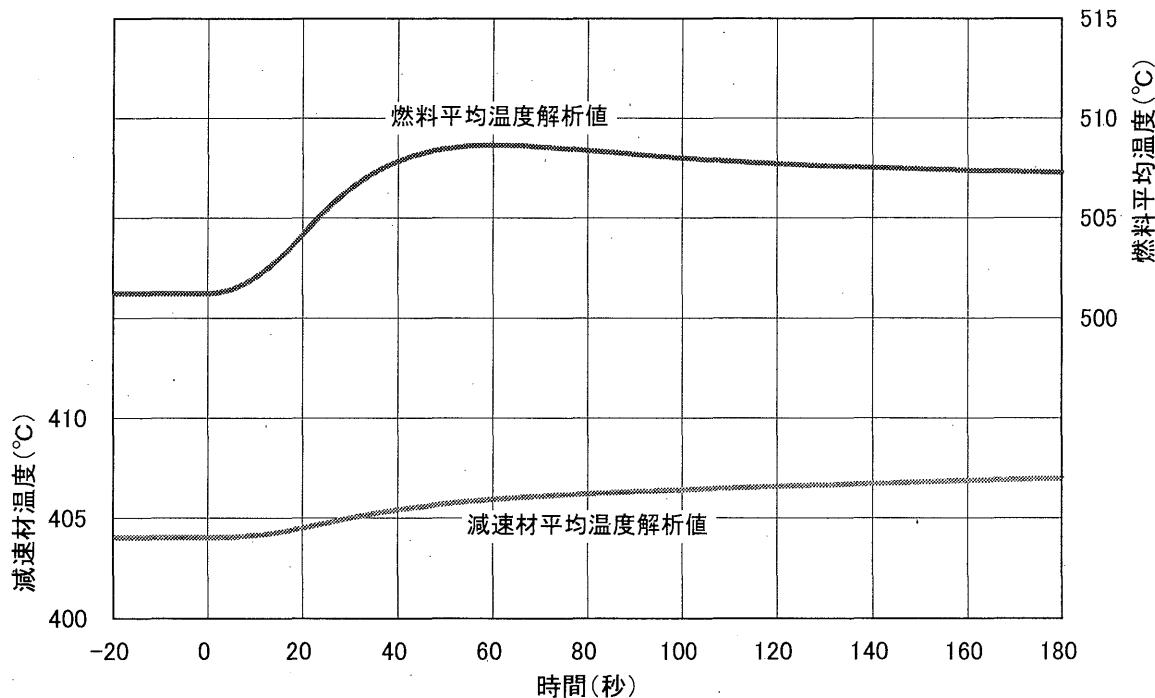


Fig. A6-3 制御棒引抜き試験の動特性解析結果 試験ケース：15MW-2（燃料及び減速材温度変化）

試験ケース：15MW-3

Table A7-1 動特性解析条件

項目	解析条件
初期原子炉出力 (MW)	15.5
制御棒引抜き量 (mm)	41
制御棒引抜き速度 (mm/sec)	1.49
添加反応度 (%Δk/k)	0.048
燃料温度係数 ($\Delta k/k/^\circ C$)	-4.5×10^{-5}
減速材温度係数 ($\Delta k/k/^\circ C$)	-3.1×10^{-5}
遅発中性子割合 (%)	0.65
即発中性子寿命 (sec)	9.4×10^{-4}

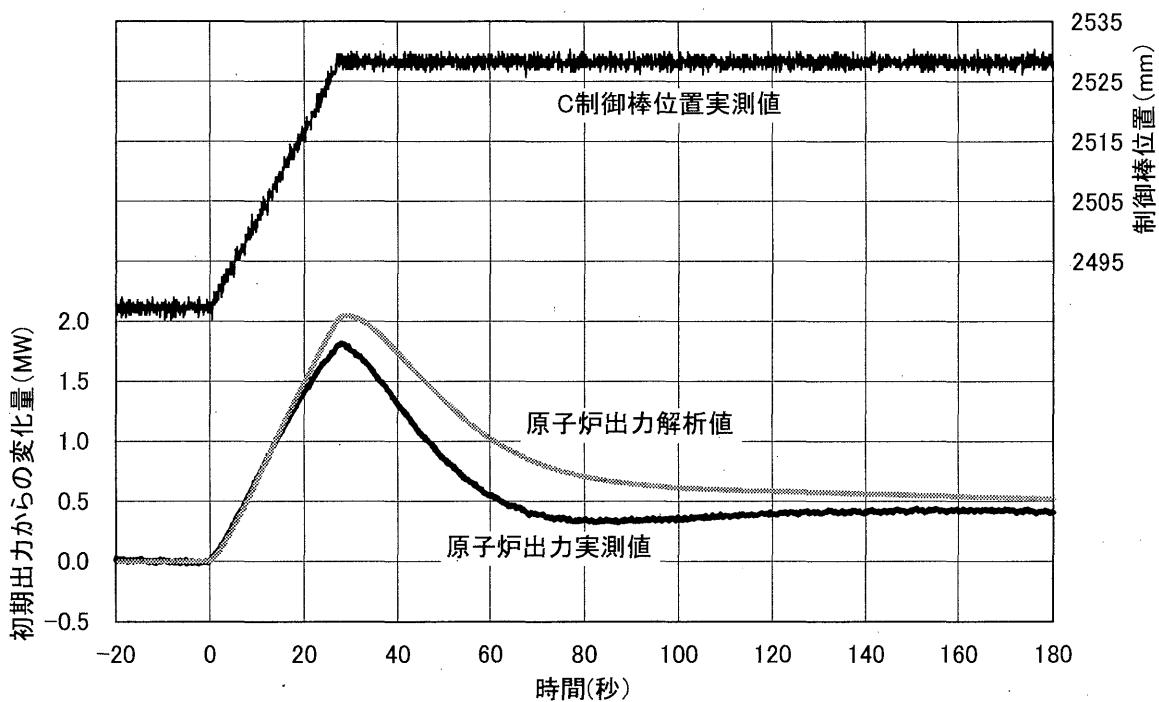


Fig. A7-1 制御棒引抜き試験の動特性解析結果 試験ケース：15MW-3 (原子炉出力変化)

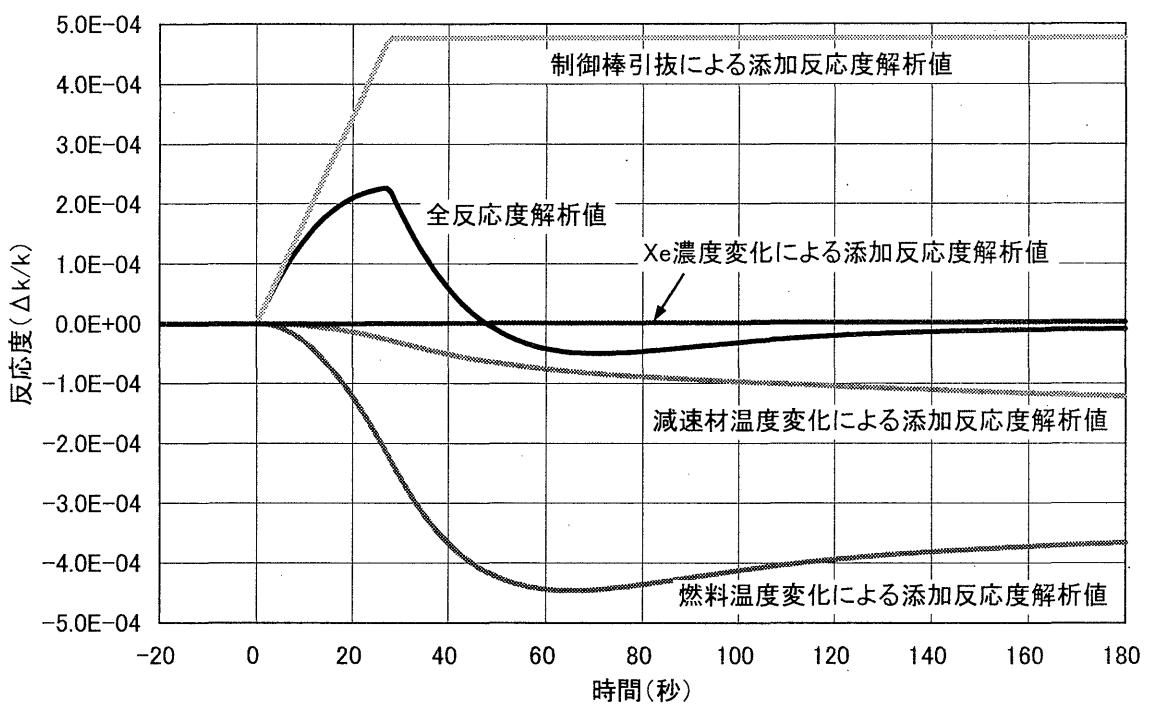
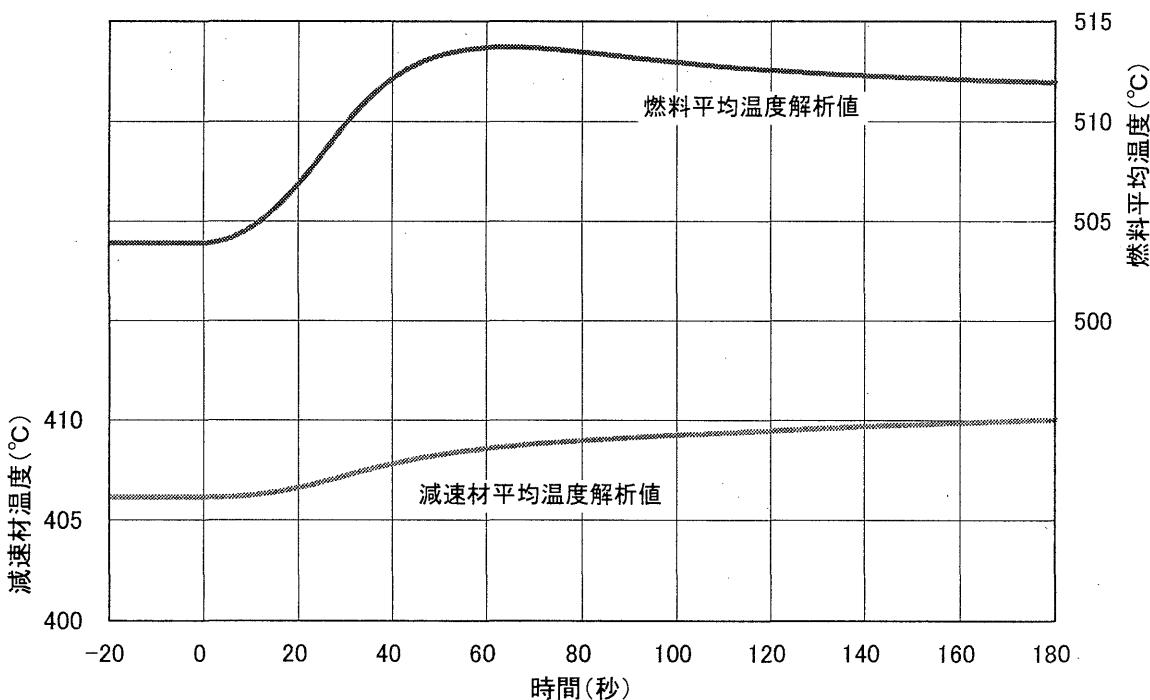


Fig. A7-2 制御棒引抜き試験の動特性解析結果 試験ケース：15MW-3（反応度変化）



試験ケース：15MW-4

Table A8-1 動特性解析条件

項目	解析条件
初期原子炉出力 (MW)	15.0
制御棒引抜き量 (mm)	19
制御棒引抜き速度 (mm/sec)	4.45
添加反応度 (%Δk/k)	0.022
燃料温度係数 ($\Delta k/k/^\circ C$)	-4.5×10^{-5}
減速材温度係数 ($\Delta k/k/^\circ C$)	-3.1×10^{-5}
遅発中性子割合 (%)	0.65
即発中性子寿命 (sec)	9.4×10^{-4}

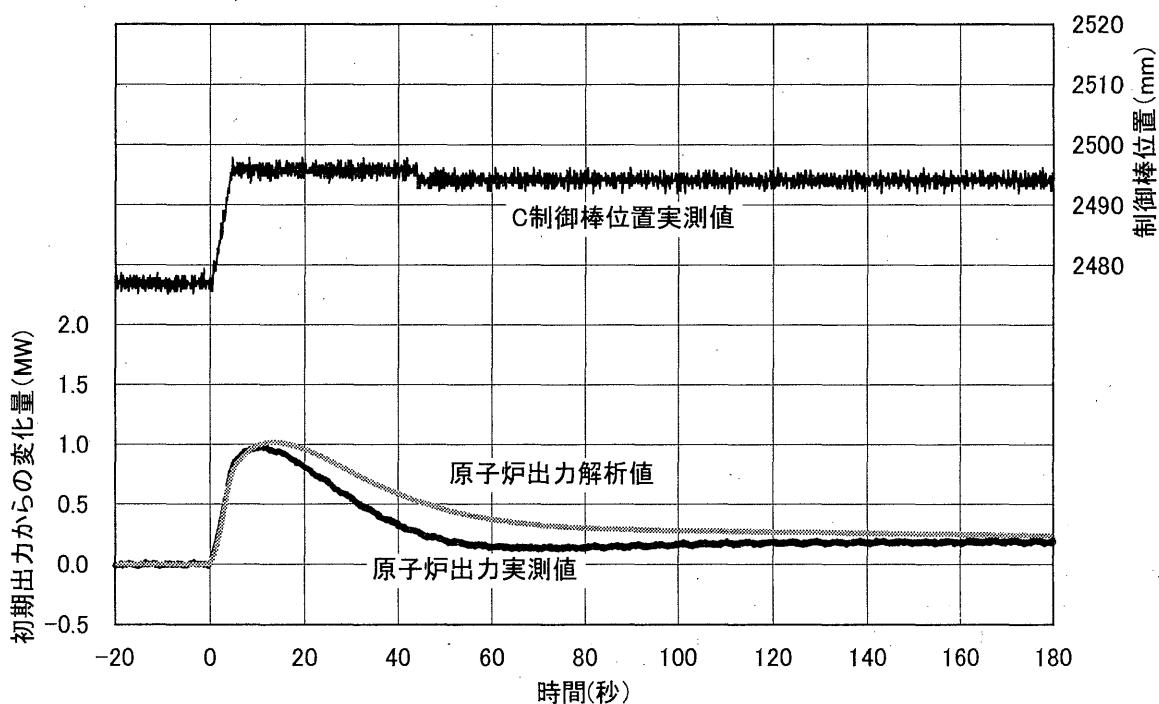


Fig. A8-1 制御棒引抜き試験の動特性解析結果 試験ケース：15MW-4 (原子炉出力変化)

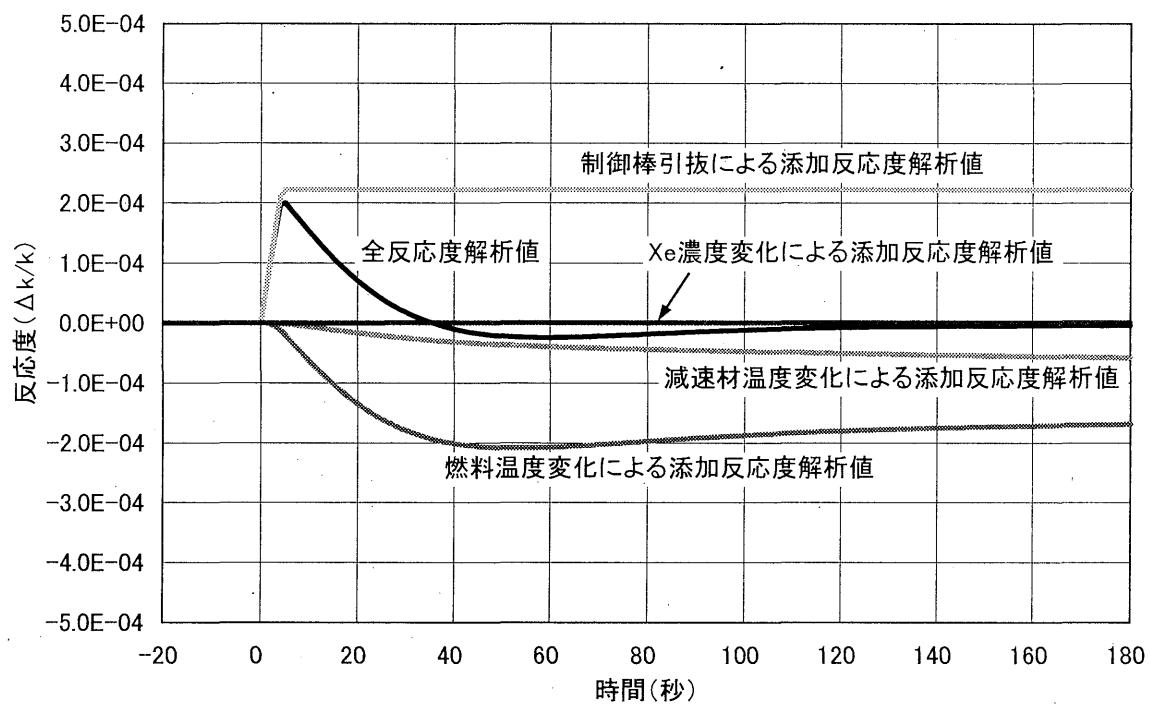


Fig. A8-2 制御棒引抜き試験の動特性解析結果 試験ケース：15MW-4（反応度変化）

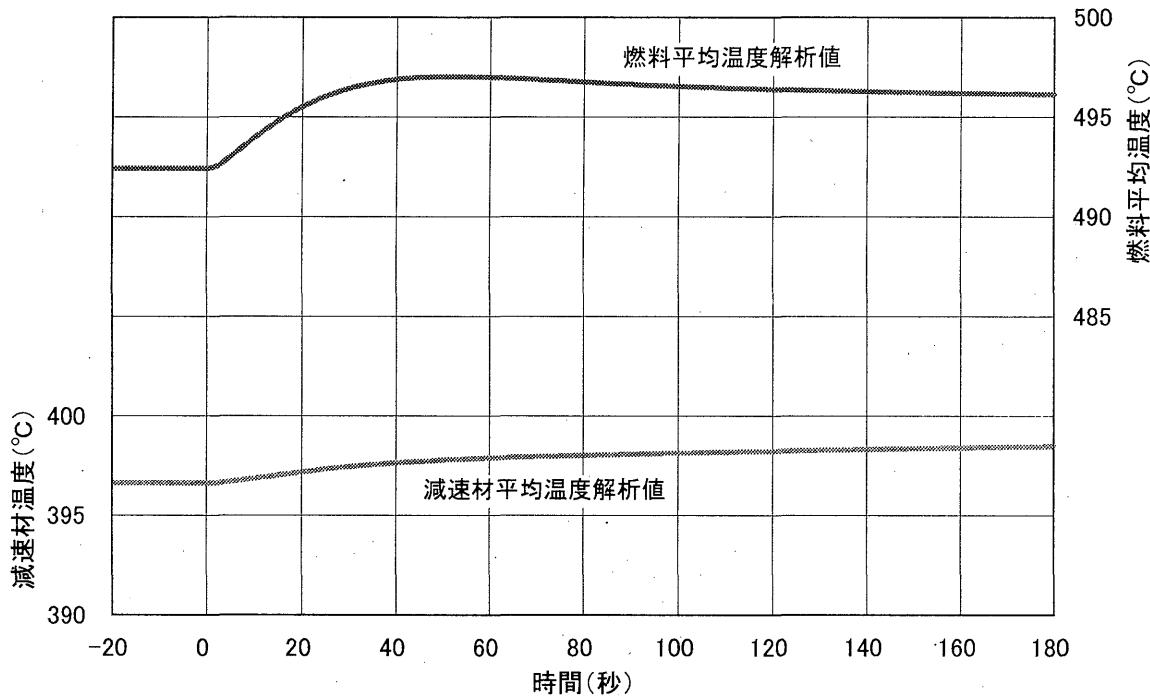


Fig. A8-3 制御棒引抜き試験の動特性解析結果 試験ケース：15MW-4（燃料及び減速材温度変化）

試験ケース：15MW-5

Table A9-1 動特性解析条件

項目	解析条件
初期原子炉出力 (MW)	15.1
制御棒引抜き量 (mm)	29
制御棒引抜き速度 (mm/sec)	4.35
添加反応度 (%Δk/k)	0.034
燃料温度係数 ($\Delta k/k/^\circ C$)	-4.5×10^{-5}
減速材温度係数 ($\Delta k/k/^\circ C$)	-3.1×10^{-5}
遅発中性子割合 (%)	0.65
即発中性子寿命 (sec)	9.4×10^{-4}

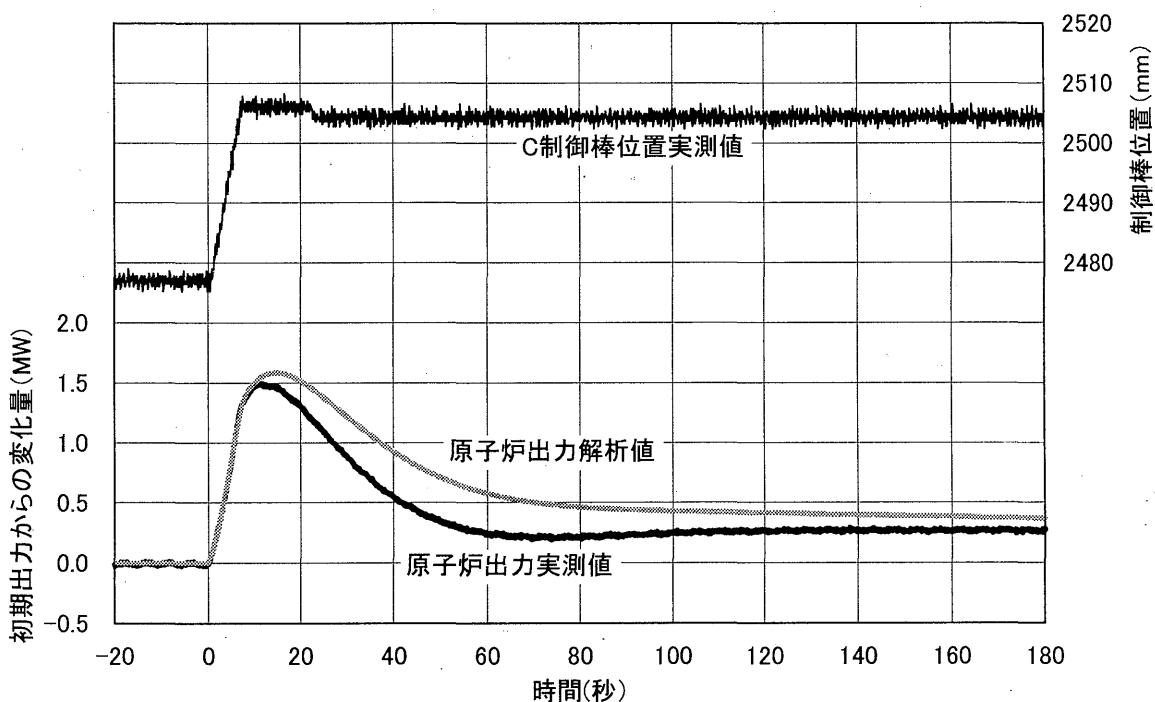


Fig. A9-1 制御棒引抜き試験の動特性解析結果 試験ケース：15MW-5（原子炉出力変化）

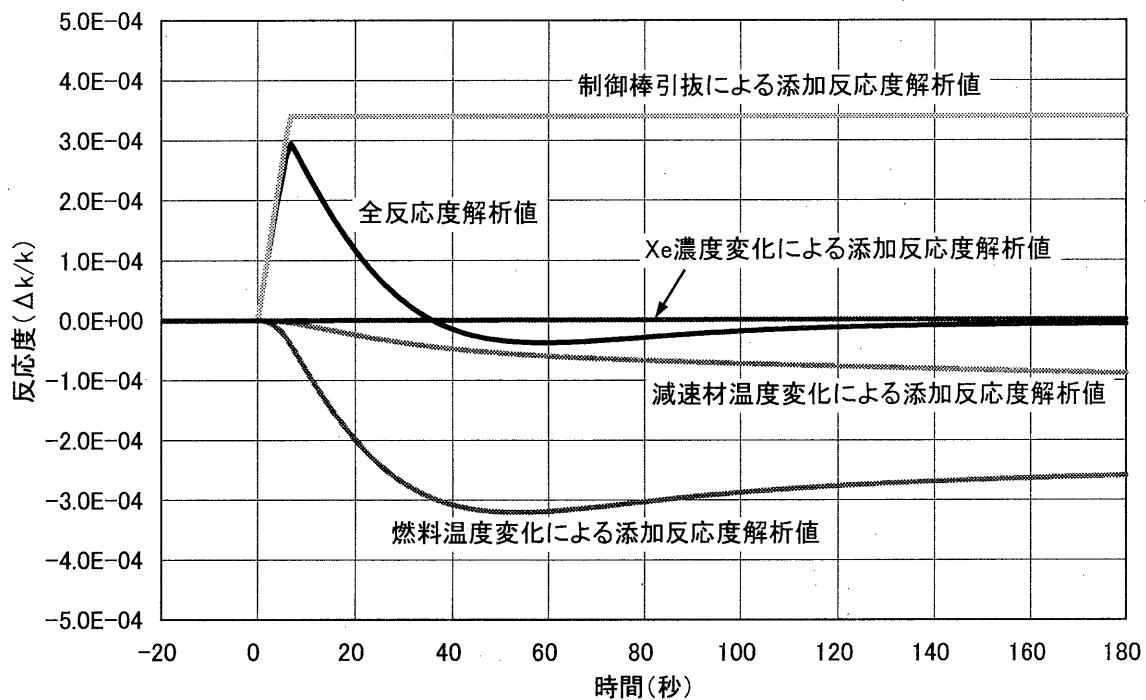


Fig. A9-2 制御棒引抜き試験の動特性解析結果 試験ケース：15MW-5（反応度変化）

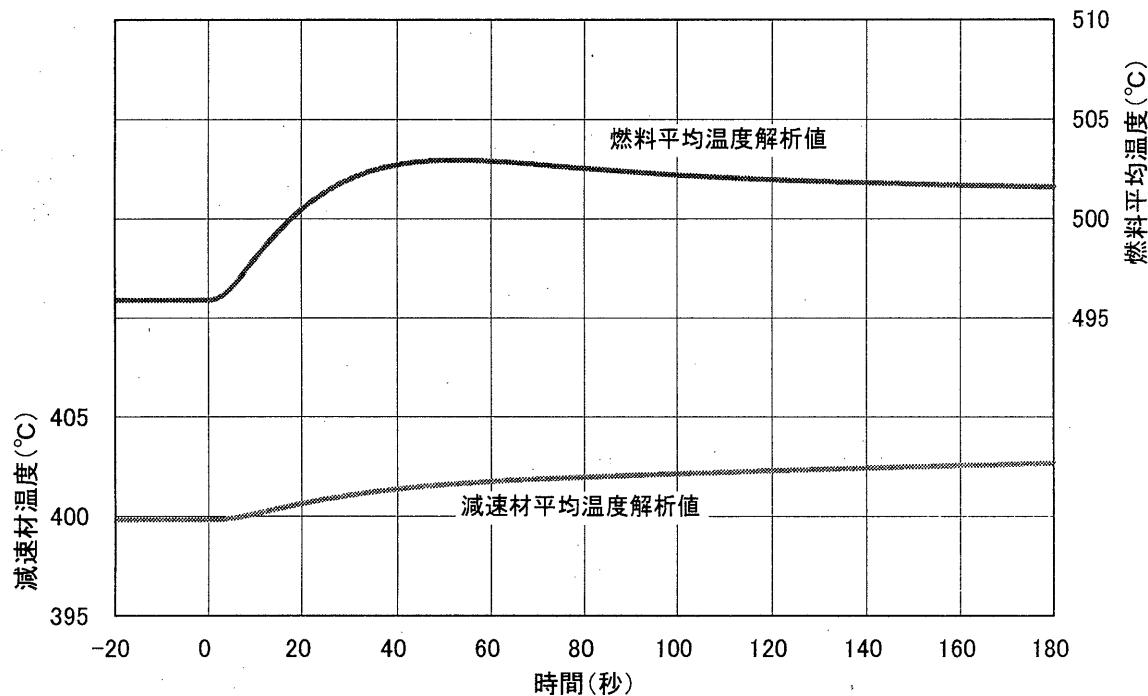


Fig. A9-3 制御棒引抜き試験の動特性解析結果 試験ケース：15MW-5（燃料及び減速材温度変化）

試験ケース：15MW-6

Table A10-1 動特性解析条件

項目	解析条件
初期原子炉出力 (MW)	15.2
制御棒引抜き量 (mm)	29
制御棒引抜き速度 (mm/sec)	4.44
添加反応度 (%Δk/k)	0.034
燃料温度係数 ($\Delta k/k^{\circ}\text{C}$)	-4.5×10^{-5}
減速材温度係数 ($\Delta k/k^{\circ}\text{C}$)	-3.1×10^{-5}
遅発中性子割合 (%)	0.65
即発中性子寿命 (sec)	9.4×10^{-4}

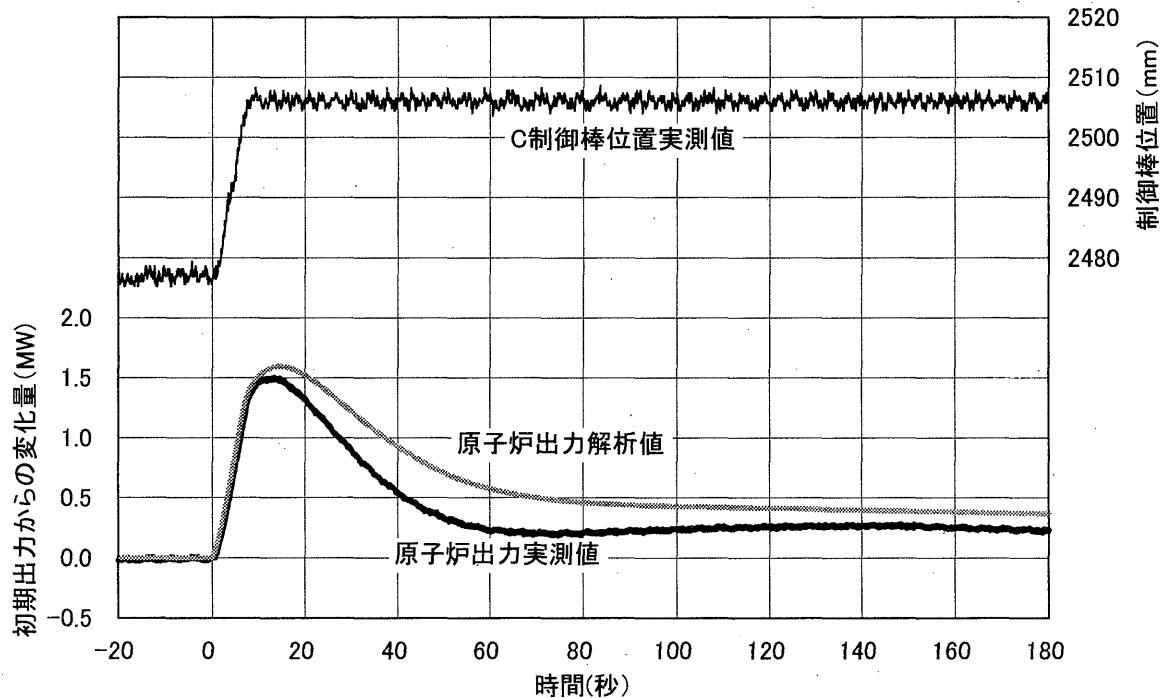


Fig. A10-1 制御棒引抜き試験の動特性解析結果 試験ケース：15MW-6 (原子炉出力変化)

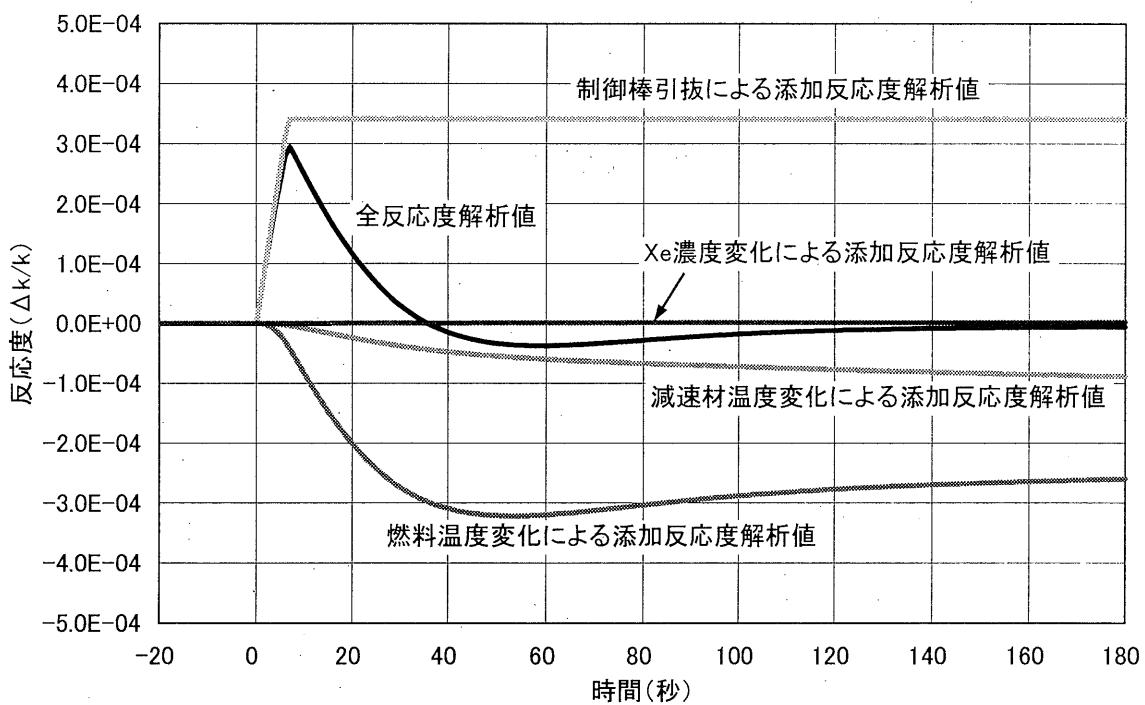


Fig. A10-2 制御棒引抜き試験の動特性解析結果 試験ケース：15MW-6（反応度変化）

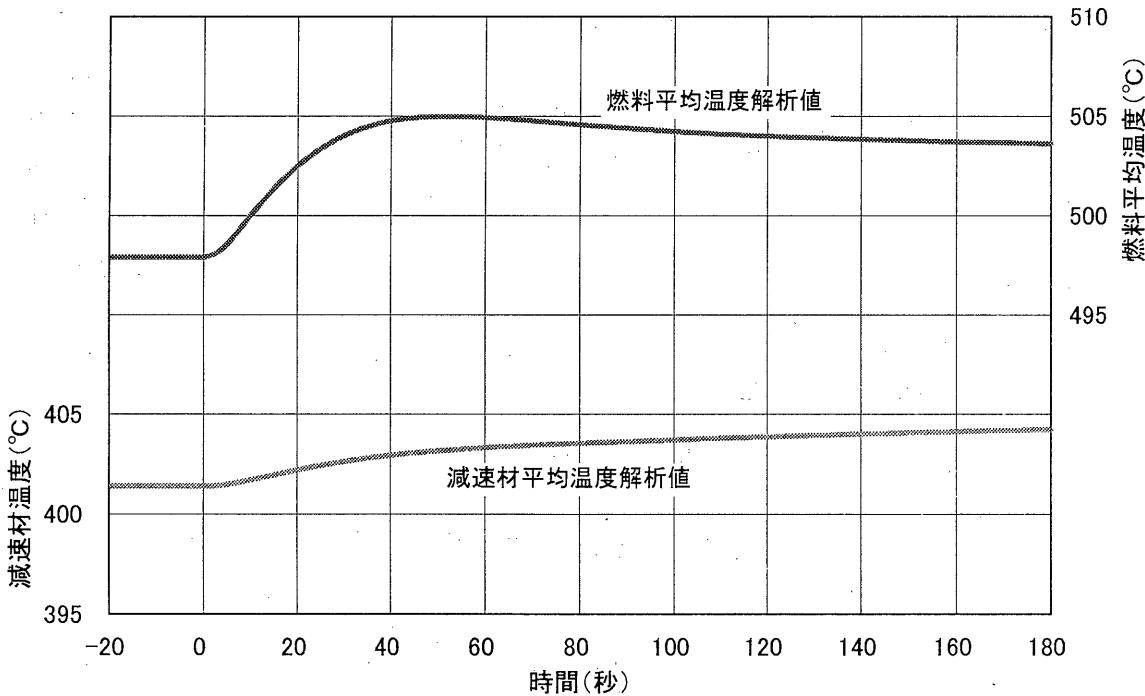


Fig. A10-3 制御棒引抜き試験の動特性解析結果 試験ケース：15MW-6(燃料及び減速材温度変化)

試験ケース：15MW-7

Table A11-1 動特性解析条件

項目	解析条件
初期原子炉出力 (MW)	15.1
制御棒引抜き量 (mm)	11
制御棒引抜き速度 (mm/sec)	4.38
添加反応度 (%Δk/k)	0.014
燃料温度係数 ($\Delta k/k/^\circ C$)	-4.5×10^{-5}
減速材温度係数 ($\Delta k/k/^\circ C$)	-3.1×10^{-5}
遅発中性子割合 (%)	0.65
即発中性子寿命 (sec)	9.4×10^{-4}

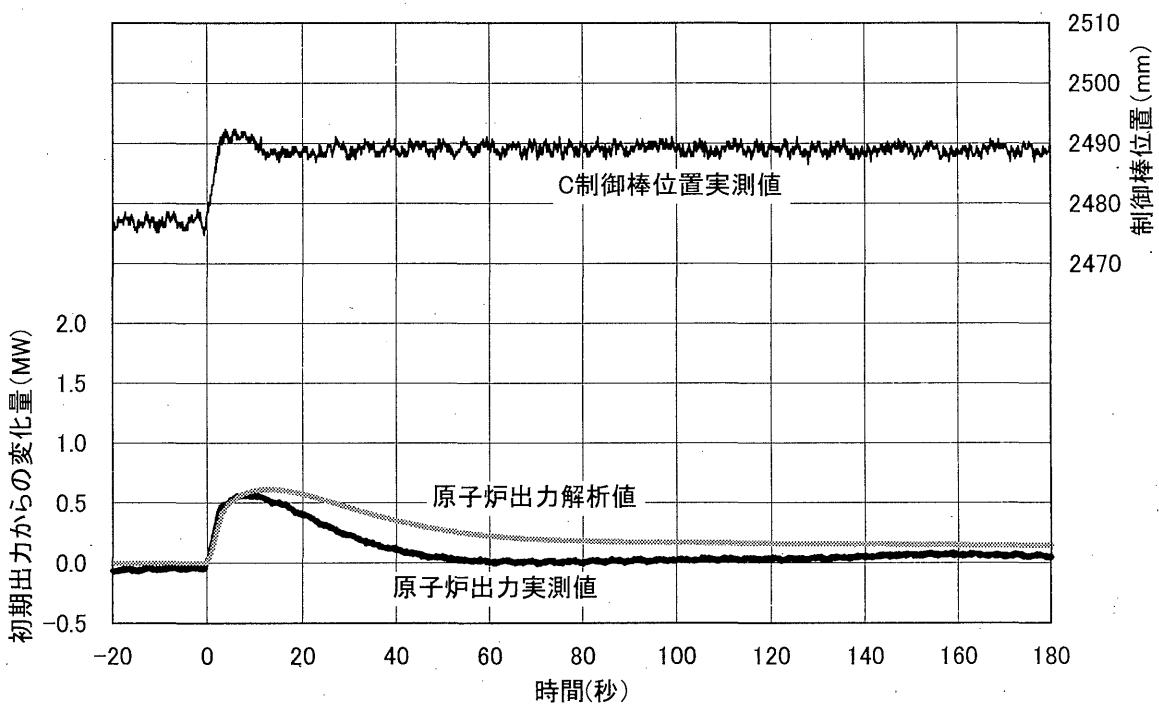


Fig. A11-1 制御棒引抜き試験の動特性解析結果 試験ケース：15MW-7 (原子炉出力変化)

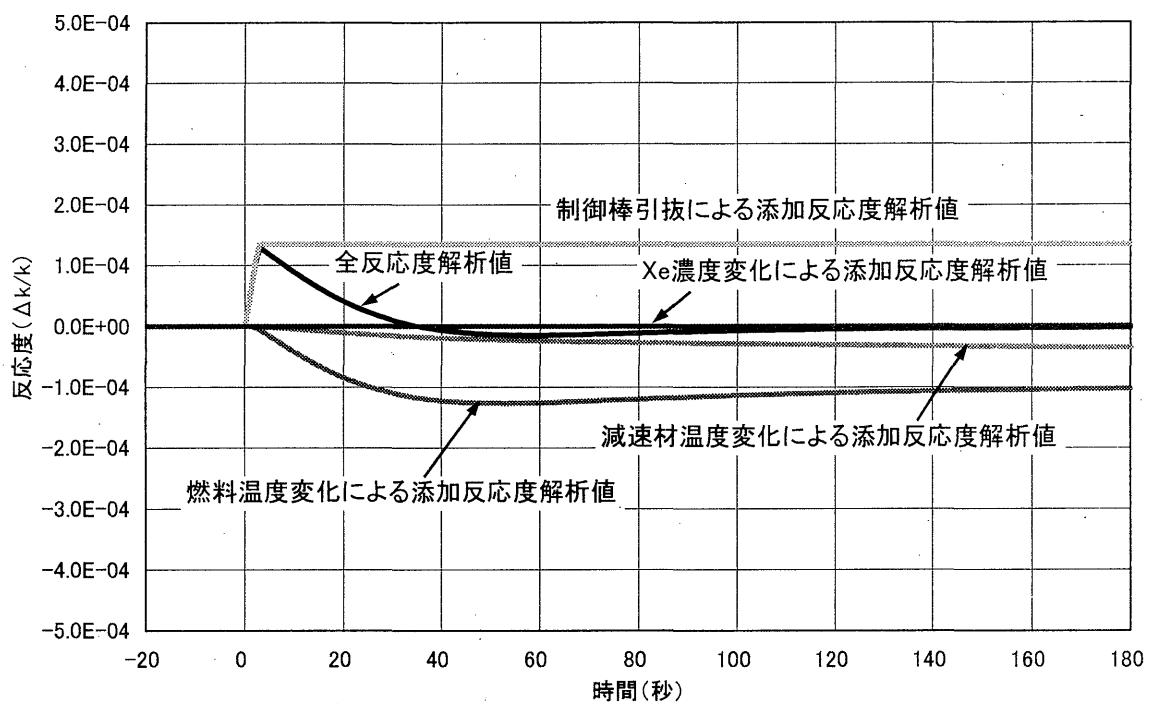


Fig. A11-2 制御棒引抜き試験の動特性解析結果 試験ケース：15MW-7（反応度変化）

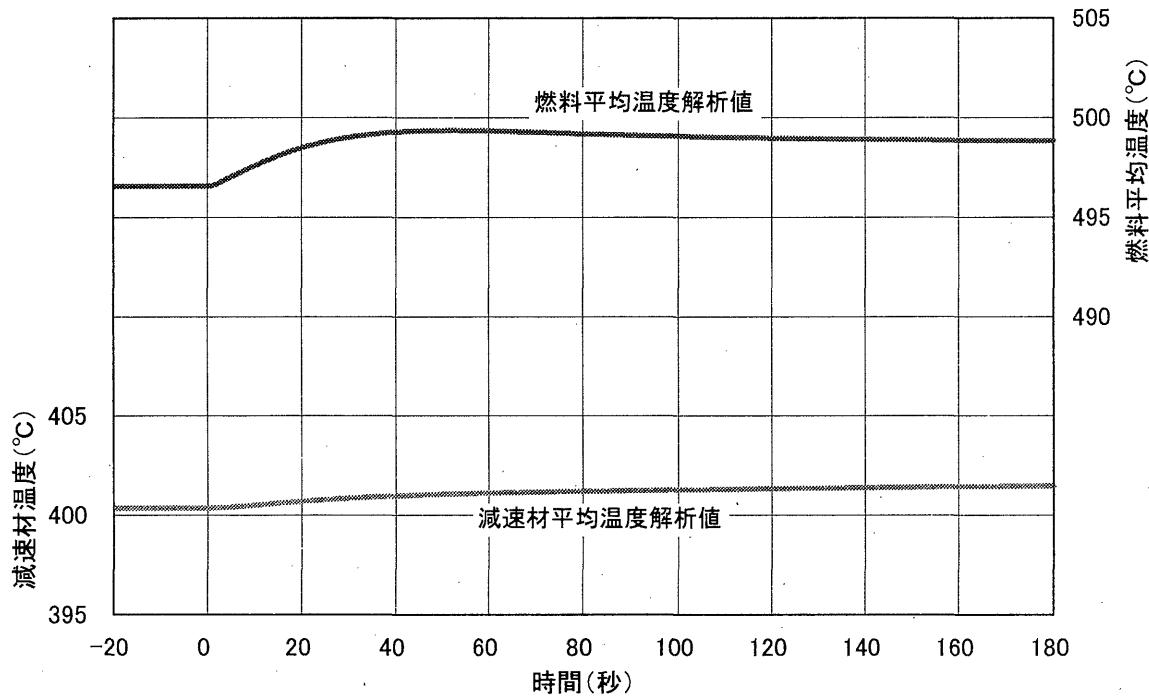


Fig. A11-3 制御棒引抜き試験の動特性解析結果 試験ケース：15MW-7(燃料及び減速材温度変化)

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
力	ニュートン	N	$m \cdot kg/s^2$
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$N \cdot m$
工率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	$A \cdot s$
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	$V \cdot s$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	$cd \cdot sr$
照度	ルクス	Ix	lm/m^2
放射能	ベクレル	Bq	s^{-1}
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^9	ギガ	G
10^6	メガ	M
10^3	キロ	k
10^2	ヘクト	h
10^1	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表す場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レンントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

換算表

力	$N(=10^5 \text{ dyn})$	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
9.80665		1	2.20462
4.44822		0.453592	1

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 10 \text{ P} (\text{ポアズ}) (\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St} (\text{ストークス}) (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧	$MPa(=10 \text{ bar})$	kgf/cm^2	atm	mmHg(Torr)	$lbf/in^2(\text{psi})$
	1	10.1972	9.86923	7.50062×10^3	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10^{-4}	1.35951×10^{-3}	1.31579×10^{-3}	1	1.93368×10^{-2}
	6.89476×10^{-3}	7.03070×10^{-2}	6.80460×10^{-2}	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	$J(=10^7 \text{ erg})$	$kgf \cdot m$	$kW \cdot h$	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
	1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{18}	= 4.184 J (熱化学)
9.80665		1	2.72407×10^{-6}	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{19}	= 4.1855 J (15 °C)
3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^5	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{25}		= 4.1868 J (国際蒸気表)
4.18605		0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{19}	仕事率 1 PS (仏馬力)
1055.06		107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{21}	= 75 kgf · m/s
1.35582		0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{18}	= 735.499 W
1.60218×10^{-19}	1.63377×10^{-20}	4.45050×10^{-26}	3.82743×10^{-20}	1.51857×10^{-22}	1.18171×10^{-19}	1		

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
	1	2.70270×10^{-11}		1	100
	3.7×10^{10}	1		0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58×10^{-4}	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

HTR制御棒引抜き試験の動特性解析（受託調査）



古紙配合率100%
白色度70%の再生紙を使用しています