

JAERI-Tech

2003-094



JP0450261



NSRRシミュレータの改良

2004年1月

村尾 裕之・谷内 茂康・太田 和則
村松 靖之・中村 武彦・寺門 義文

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）で複写による実費領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.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 2004

編集兼発行 日本原子力研究所

NSRR シミュレータの改良

日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター原子炉安全工学部
村尾 裕之・谷内 茂康・太田 和則・村松 靖之・中村 武彦・寺門 義文

(2003年11月28日受理)

NSRR で台形パルス運転及び合成パルス運転を行う場合は、あらかじめオフラインシミュレーション及びオンラインシミュレーションを行い燃料温度、積分出力、最高出力、制御棒位置、制御棒駆動速度といった面から、目的とする運転パターンの安全性や、妥当性を確認する必要がある。これらのシミュレータを用いることによって実際の NSRR 炉出力をほぼ模擬することができるが、開ループ制御による数百ワットまでの低出力からメガワット出力への初期出力上昇時や閉ループ制御による出力制御運転において、シミュレータによる計算値と実運転結果との間に若干の不一致が認められている。このため、制御棒の反応度係数及び燃料温度フィードバック係数を再評価しシミュレータに反映した。その結果、初期立ち上げ時の出力や制御棒の引抜量のシミュレーション精度を向上させることができ、NSRR の台形パルス運転及び合成パルス運転の自由度を向上することができた。

Improvement of the NSRR Simulator

Hiroyuki MURAO, Shigeyasu YACHI, Kazunori OHTA, Yasuyuki MURAMATSU,
Takehiko NAKAMURA and Yoshifumi TERAKADO

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

(Received November 28, 2003)

Prior to actual runs in the shaped pulse and combined pulse operations in the NSRR, the online simulation and offline simulation must be performed to examine safety and validity in terms of fuel temperature, integral reactor power, maximum power, rod position and rod speed. Actual reactor power of the NSRR can be well simulated in most cases, but a slight difference remains between the present simulation results and actual operation during the NSRR start-up phase under open loop control and power controlled operation under closed loop control. Regulating rod worth and fuel temperature feedback reactivity were re-evaluated and updated. As a result, the accuracy of the simulator was remarkably improved with respect to the transients of the reactor power during the start-up phase and control rod position under the closed-loop control, so that flexibility of the shaped and combined pulse operations were improved.

Keywords: NSRR, Online Simulation, Offline Simulation, Pulse Operation, Excuse, Anacom

目次

1. 緒言	1
2. NSRR概要	2
2. 1 NSRRの構造	2
2. 2 運転方式	5
2. 3 パルス自動運転 (SP、CP 運転)	6
3. NSRR シミュレータの概要	11
4. シミュレータの改良	17
4. 1 改良箇所	17
4. 2 改良内容	17
4. 2. 1 反応度価値曲線の変更	17
4. 2. 2 燃料温度フィードバック反応度計算式の変更	17
4. 2. 3 燃料温度計算へ時定数の導入	17
5. 確認運転	29
6. 考察	34
7. まとめ	40
謝辞	40
参考文献	40
付録	41

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of NSRR	2
2. 1 Structure of NSRR	2
2. 2 Operation Pattern	5
2. 3 Automatic Pulse Operation (SP, CP Operations)	6
3. Out Line of the NSRR Simulator	11
4. Improvement of Simulator	17
4. 1 Summary of Improvement	17
4. 2 Details of Improvement	17
4. 2. 1 Improvement of Regulating Rod Worth Curve	17
4. 2. 2 Improvement of Equation of Fuel Temperature Feedback Reactivity	17
4. 2. 3 Introduction of Time Constant for Fuel Temperature Equation	17
5. Operation for Verification	29
6. Discussion	34
7. Summary	40
Acknowledgment	40
References	40
Appendix	41

1. 緒言

日本原子力研究所の NSRR（原子炉安全性研究炉）¹⁾は、反応度事故時の燃料挙動を解明する炉内実験のために建設されたパルス炉であり、昭和 50 年 6 月に初臨界に達した後、同年 10 月より実験に供されてきた。

NSRR では 3 種類のパルス運転、すなわち、未臨界状態から最高 $0.0343 \Delta k$ (4.7\$) の反応度を 0.1 秒で投入する単一パルス (NP) 運転、最高 10MWまでの任意の過渡出力を積算出力 110MWs の範囲内で実現できる台形パルス (SP) 運転、NP 運転と SP 運転を組み合わせた運転で出力運転状態からの反応度事故、もしくは軽水炉の高いランアウト出力の反応度事故を模擬した運転が行える合成パルス (CP) 運転が行われる。

SP 運転及び CP 運転では、調整棒と呼ばれる制御棒をコンピュータ制御により高速で駆動することにより任意の出力波形の過渡事象を実現することができる。この運転では、最高約 75mm/s の速度で調整棒を駆動し出力を制御する。制御方式は、コンピュータによる閉ループ制御による出力制御及び開ループ制御による制御棒の位置制御の 2 種類があり、これらを適宜切り替えて最適な運転を実現している²⁾。位置制御は主に数百ワットまでの低出力からメガワット出力への初期出力上昇時に用いられ、出力制御はその後の出力調整に用いられる。これらの運転では、実運転に先立ち、オフラインシミュレータとオンラインシミュレータという 2 種類のシミュレータを用い、目的とする運転の安全性や妥当性を確認している。

オフラインシミュレータ³⁾は、原子炉の動特性を 1 点炉近似でモデル化した EXCURS-NSRR 及び制御系の応答を模擬する ANACOM を結合させたシミュレータであり、計算機上でのみのシミュレーションである。オンラインシミュレータは、炉心モデルはオフラインと同様の EXCURS-NSRR を用い、制御機構は実機の制御回路及び制御棒駆動装置を用い制御棒の移動による原子炉の応答を計算するシミュレータである。

これまでに行った運転の結果から、これらのシミュレータを使うことによって、実際の NSRR 炉出力をほぼ模擬できることが明らかになっている。しかしながら、NSRR の能力を最大限に引き出し、かつ安全に試験を行うためには、位置制御による初期出力上昇時の炉出力評価及び出力制御時の制御棒引き抜き量等について、精度向上をはかる必要がある。そこで、NSRR の制御棒価値及び温度フィードバック係数等について再評価を行い、オフライン及びオンライン両シミュレータの精度向上をはかった。

2. NSRR 概要

2. 1 NSRR の構造

原子炉安全性研究炉 NSRR(Nuclear Safety Research Reactor)は、原子炉燃料の安全性を研究するための専用炉として建設されたものであり、米国 GA(General Atomic)社によって開発された熱中性子パルス炉 TRIGA-ACPR に改良を加えたものである。その構造は、Fig.2-1 に示すように、水深約 9m のスイミングプール型の原子炉で、炉心はプール底部に位置しており、炉心の燃料要素の冷却はプール水の自然循環によって行う。この炉心の中央部を、内径約 22cm の中空実験孔が垂直に貫通している。実験孔は、炉心上部で Y 字状に分岐してプール上面に達するが、このうち垂直に伸びた部分を垂直装填管、傾斜して伸びた部分をオフセット装填管と呼ぶ。実験に当たっては、実験燃料を収納したカプセル等を、オフセット装填管を通して炉心中央部の実験孔に挿入する。

NSRR の炉心燃料は、直径約 3.6cm、有効長約 38cm の濃縮ウラン-水素化ジルコニウム(U-ZrH 合金)を燃料体とし、その上下に長さ約 8.7cm の黒鉛反射体を配し、これらをステンレス鋼製被覆材で覆ったものである。この燃料が Fig.2-2 に示すように、157 本炉心に装荷されている。この燃料は、中性子減速材である水素が燃料中に含まれているため、原子炉の出力が急上昇すると自己制御性により急激に出力を低下させる特徴を持つ。

燃料要素は、Fig.2-2 に示すように実験孔の周囲に配置され、等価直径約 63cm の炉心を構成する。また、炉心内には安全棒 2 本、調整棒 6 本及びトランジエント棒 3 本の合計 11 本の制御棒が配置されており、各制御棒は、原子炉プール上面に設置した制御棒駆動機構によって駆動される。安全棒は、スクラムを含む原子炉停止を目的として使用され、調整棒は出力調整及び反応度補償を目的として使用される。安全棒及び調整棒の構造は同一であり、長さ約 38cm の中性子吸收体 (B_4C) の下部に、同一長の燃料体 (U-ZrH 合金) (燃料要素の燃料体と同一) を配し、これをステンレス鋼製被覆材で覆った構造となっている。安全棒及び調整棒の駆動は、ステッピングモータによって行われる。トランジエント棒には、高速トランジエント棒 (2 本) 及び調節用トランジエント棒 (1 本) の 2 種類があり、パルス運転における急速な正の反応度添加を行う目的で使用される。高速トランジエント棒は、長さ約 76cm の中性子吸收体 (B_4C) の下部に空気フォロア (上下を封じた空気筒) を配し、これをアルミニウム合金製被覆材で覆った構造になっている。高速トランジエント棒の駆動は、圧縮空気によって行われる。調節用トランジエント棒は、長さ約 38cm の中性子吸收体 (B_4C) の下部に空気フォロアを配し、これをアルミニウム合金製被覆材で覆った構造となっている。調節用トランジエント棒の駆動は、ステッピングモータ及び圧縮空気によって行われ、パルス運転の際の反応度添加量を調節する目的で使用される。

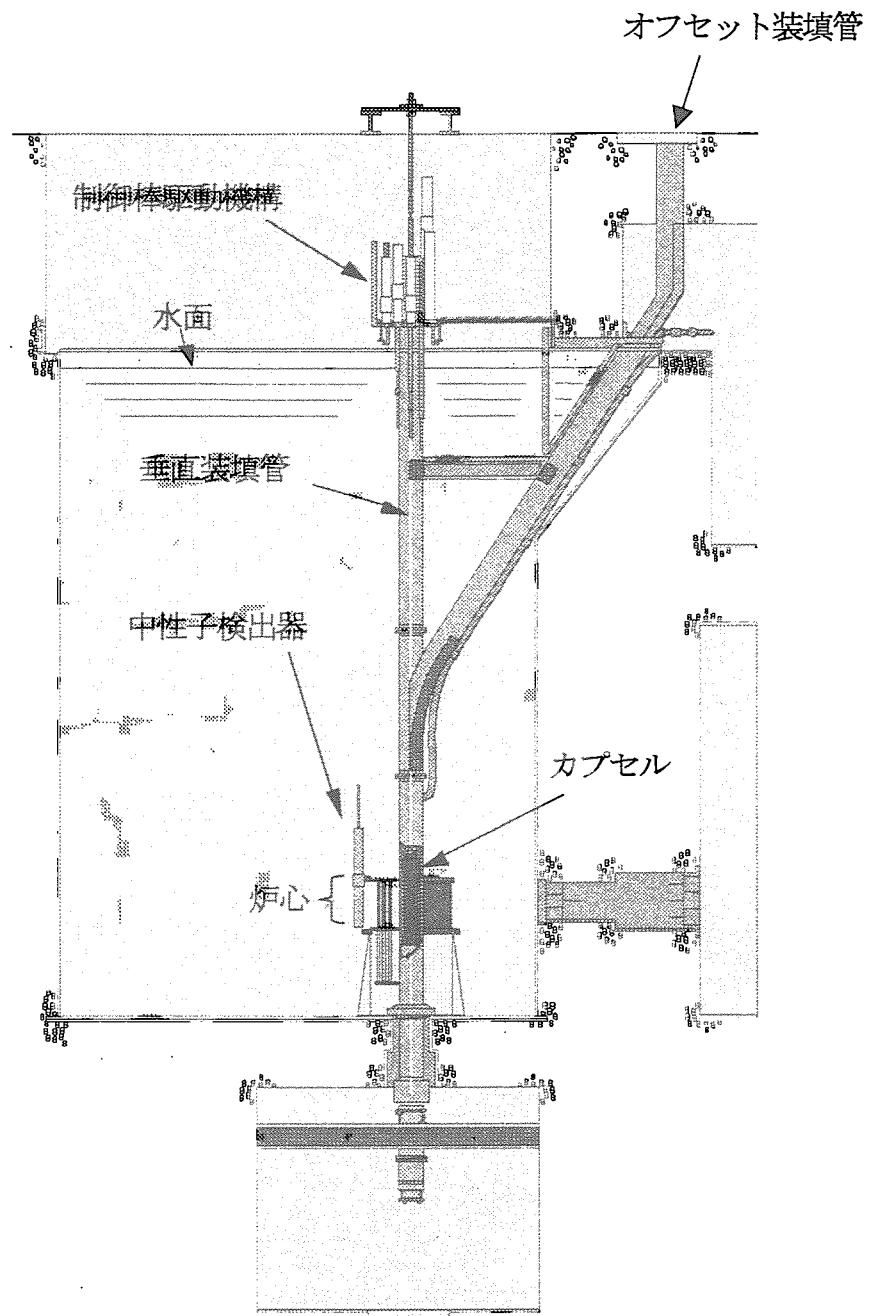
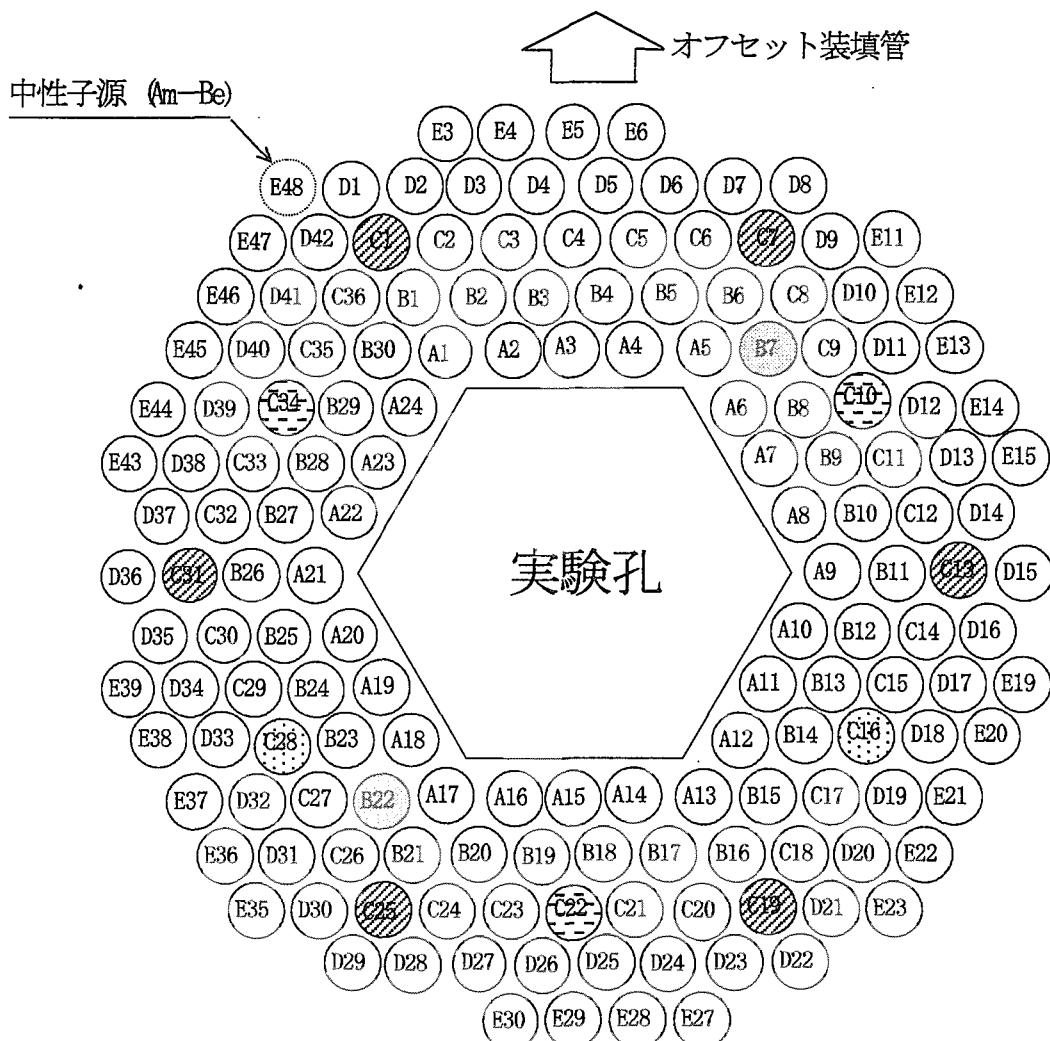


Fig.2-1 NSRR原子炉本体立面図



制御棒の名称	炉心装荷位置	凡例
調整棒	R-1	C- 1
	R-2	C- 7
	R-3	C-13
	R-4	C-19
	R-5	C-25
	R-6	C-31
安全棒	S-1	C-16
	S-2	C-28
トランジエント棒	T-A	C-10
	T-B	C-22
	T-C	C-34
計装燃料	FT-1	B- 7
	FT-2	B-22

Fig.2-2 NSRR 炉心断面図

2. 2 運転方式

NSRR の運転には、最高 300kWまでの定出力 (SS) 運転、トランジエント棒の急速引抜きによって零出力からの反応度事故を模擬した単一パルス (NP) 運転、異常過渡出力の模擬や小さな出力が徐々に増幅していく出力振動を模擬した台形パルス (SP) 運転、出力運転状態からの反応度事故などを模擬した合成パルス (CP) 運転がある。以下に、各運転モードにおける原子炉の運転方式を示す。なお、Fig.2-3 には各運転モードの原子炉出力特性の代表例を、Fig.2-4 には、各パルス運転での制御棒の動作を示す。

(1) 定出力 (SS) 運転

定出力 (SS) 運転では、原子炉の起動、パルス運転に備えての制御棒位置調整、300kWまでの任意の出力での運転を行う。原子炉出力の調整は調整棒の 6 本同時操作により行う。

(2) 単一パルス (NP) 運転

単一パルス (NP) 運転では、トランジエント棒を圧縮空気によって急速に引抜き、零出力から最大投入反応度 $0.0343 \Delta k$ (4.7\$) までの反応度事故を模擬する運転を行う。投入反応度量の設定は、定出力運転による臨界点確認後トランジエント棒及び調整棒の挿入量により調整する。この運転では、燃料温度 900°C 以下、出力 23000MW 以下、積分出力 130MWs 以下に制限される。

NP 運転時の制御では、機械的な停止機構に依存することなく、燃料温度上昇による固有の負の反応度フィードバックによって行う。

(3) 台形パルス (SP) 運転

台形パルス (SP) 運転では、パルス自動運転制御系を用いた調整棒の自動制御により最高出力 10MW までの任意の出力波形での過渡出力模擬運転を行う。パルス自動運転制御系にはあらかじめ、時間に対する調整棒位置と炉出力が入力された運転プログラムを入力する。自動制御は、原子炉出力を目標出力に制御する閉ループ制御及び制御棒位置を目標位置に制御する開ループ制御という 2 種類の制御方式で行われる。この運転では、燃料温度 900°C 以下、出力 10MW 以下、積分出力 110MWs 以下、制御棒速度 75mm/s 以下、調整棒位置は上下限から 2cm を除いた 34cm に制限される。

SP 運転を行う際は、あらかじめシミュレーションを行い、その運転プログラムの安全性や妥当性を確認する。シミュレータには 2 種類あり、一つは NSRR を一点炉近似モデルにより計算機上でのみシミュレートするオフラインシミュレータであり、もう一つは実炉の制御系及び制御棒駆動機構を用いてシミュレートするオンラインシミュレータである。これらのシミュレーションを利用することにより、作成した運転プログラムが実運転可能かどうかを判断する。また、シミュレーションの精度が高ければ運転裕度を最適化できるため、効率や安全性のより高い試験が実施可能となる。シミュレーションに関する詳細は次章で述べる。

(4) 合成パルス (CP) 運転

合成パルス (CP) 運転も、SP 運転と同様にパルス自動運転制御系を用いて、制御棒の自動制御

により最高出力 10MWまでの任意の出力波形での過渡出力模擬とトランジエント棒の急速引抜きを組み合わせた運転を行う。CP 運転には、高出力状態からトランジエント棒を急速引抜きする高出力一パルス運転と、トランジエント棒の急速引抜き後高出力を維持するパルス一高出力運転がある。この運転では、燃料温度 900°C以下、台形部最大出力 10MW以下、パルス部最大出力 23000MW以下、積分出力 110MWs 以下、制御棒速度 75mm/s 以下、調整棒位置は上下限から 2cm を除いた 34cm、トランジエント棒による投入反応度 $0.0292 \Delta k(4.0\$)$ 以下に制限される。

CP 運転も SP 運転と同様に、あらかじめオフラインシミュレーションとオンラインシミュレーションを行う。

2. 3 パルス自動運転 (SP、CP 運転)

パルス自動運転制御系のブロック線図を Fig.2-5 に示す。パルス自動運転制御系は計算機制御による自動運転制御であり、入力された運転プログラムに追従して実行される。運転プログラムは時間に対する調整棒位置もしくは時間に対する原子炉出力で入力される。原子炉出力の制御は、ステッピングモータ駆動による調整棒 6 本で行われる。

パルス自動運転制御系は 2 つの制御方式を持つ。一つは、制御棒を入力された目標位置に制御する開ループ制御であり、もう一つはフィードフォワード制御を導入した PID 制御により原子炉出力を目標出力に制御する閉ループ制御である⁴⁾。なお、運転プログラムの設定によって両制御方式を切り替えて運転する開閉組み合わせの制御やトランジエント棒の引き抜きタイミングの制御が可能である。

パルス自動運転を行う際の出力は 10⁶W の桁であるのに対し初期臨界出力は 15W と小さく、これだけの出力上昇を閉ループ制御で行うことは応答時間の遅さから極めて困難であるので、パルス自動運転の初期出力上昇には開ループ制御を用いている。

代表的なパルス自動運転時の出力及び制御棒位置を Fig.2-6 に示す。この運転では、最初の 1 秒間で開ループ制御により制御棒を目標位置まで引き上げ、1 秒から 12 秒まで制御棒位置を維持し、12 秒から 17 秒で閉ループ制御へ移行している。その後は引き続き閉ループ制御により出力運転を行っている。

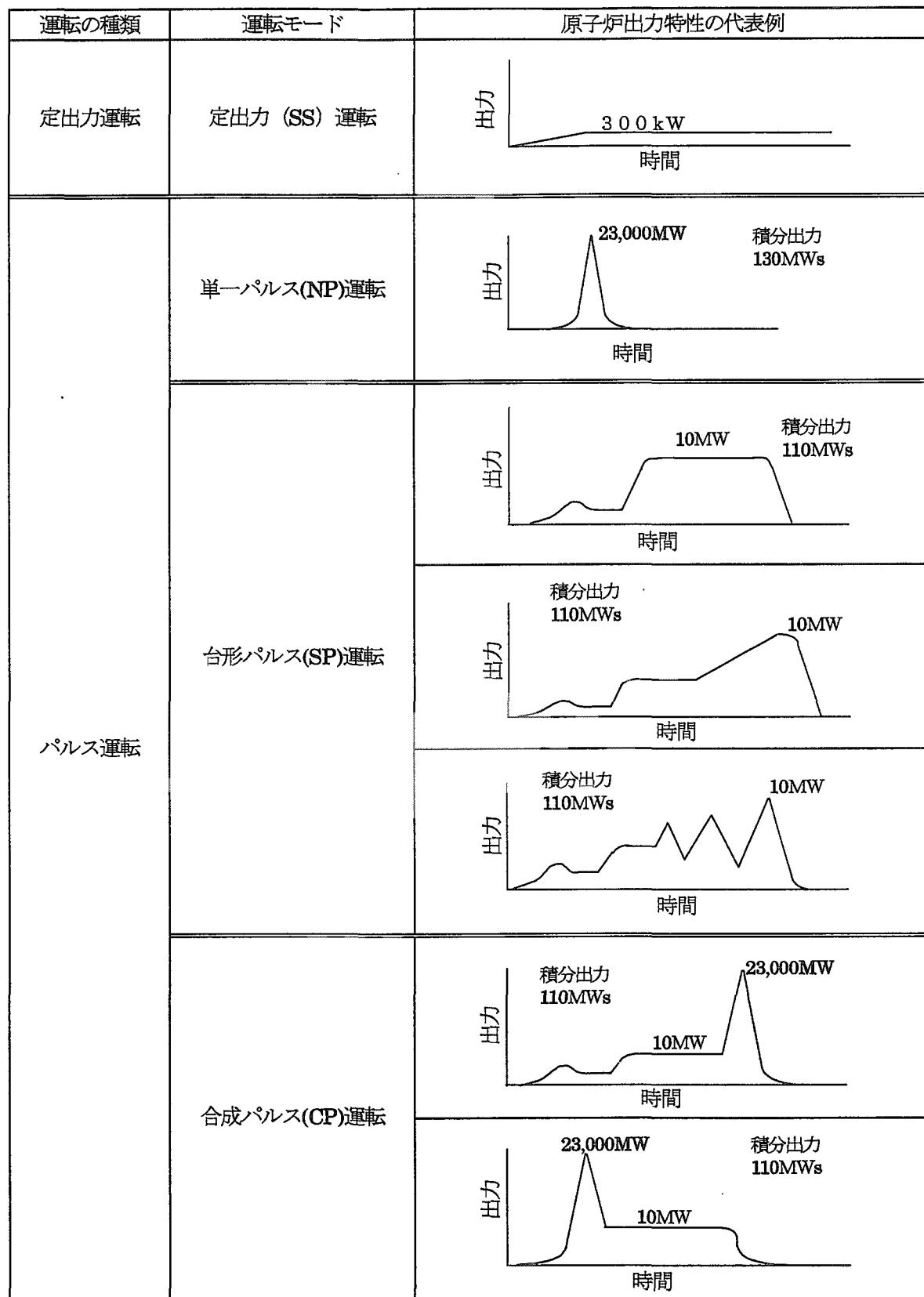


Fig.2-3 運転モード及び出力特性

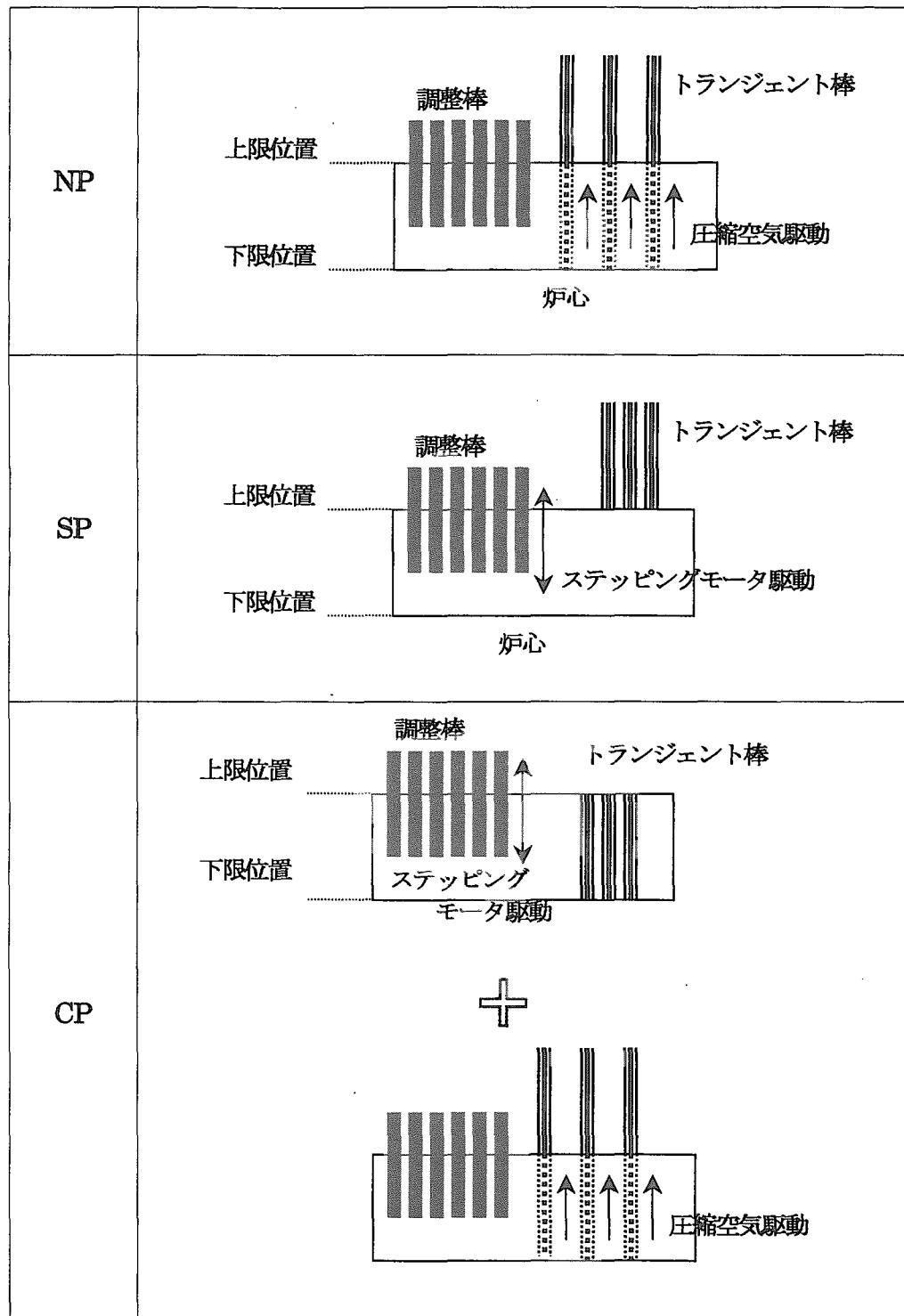


Fig.2-4 運転モードと制御棒動作

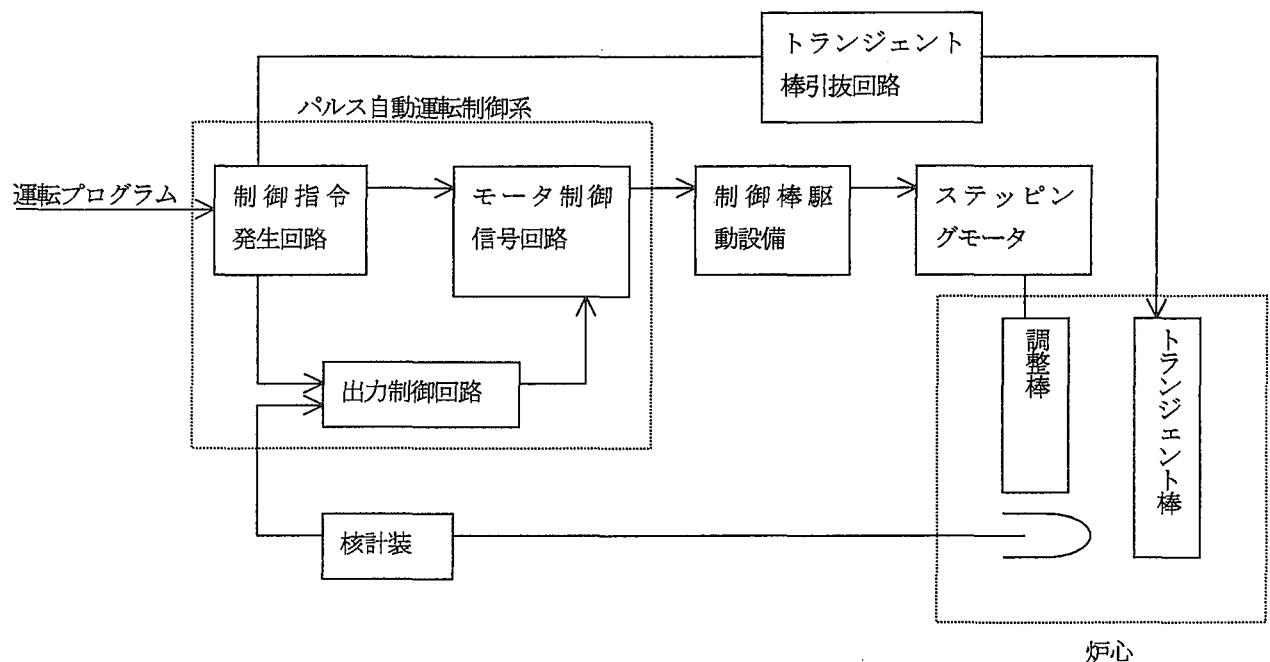


Fig.2-5 パルス自動運転制御系のブロック線図

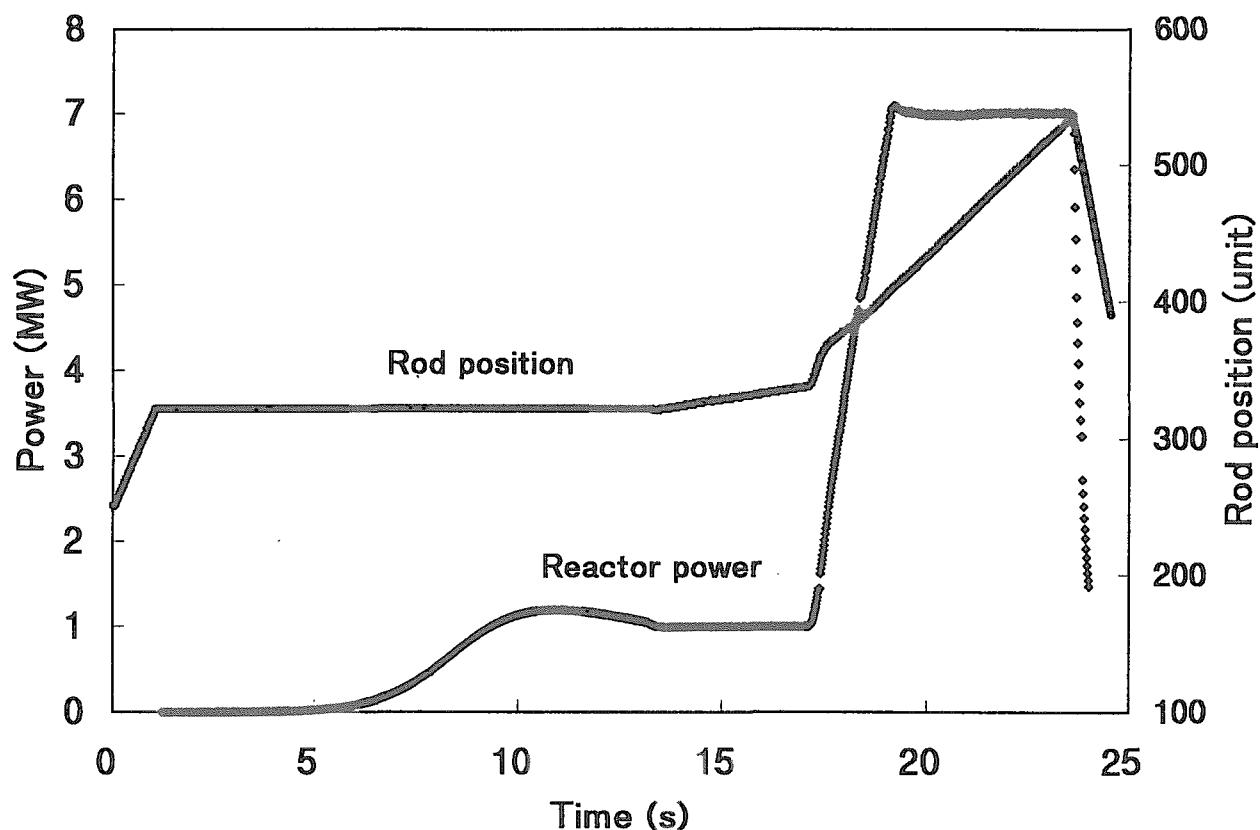


Fig.2-6 パルス自動運転の原子炉出力及び制御棒位置

3. NSRR シミュレータの概要

現在NSRRでは、オンラインシミュレータとオフラインシミュレータの2つのシミュレータが使用されている。オフラインシミュレータは制御系の応答をANACOMで、原子炉をEXCURS-NSRRで模擬する計算機のみのシミュレーションである。また、オンラインシミュレータは、制御装置は実際の原子炉運転用のものを用い原子炉からの応答をオンラインシミュレーションプログラムで模擬したシミュレータである。

SP運転及びCP運転を実施する前には、両シミュレーションを実施し運転上の制限値を超えないこと及び原子炉の制御機構に支障なく運転が行えることを確認する。

(1) オフラインシミュレータ

オフラインシミュレータは、NSRRの制御系の応答を模擬するデジタルプログラムANACOMと、NSRRの原子炉動特性を模擬するために1点炉近似でモデル化したEXCURS-NSRRを結合したものである。

Fig.3-1にオフラインシミュレータの構成を、Fig.3-2にANACOMの計算の流れを示す。ANACOMは、開ループ制御時は制御棒位置指令値に対する制御棒駆動機構の応答を計算しフィードバックする。閉ループ制御時は、指令炉出力及びフィードバックされた炉出力から駆動機構の応答を計算し、駆動量から算出された反応度をEXCURS-NSRRに出力する。

EXCURS-NSRRは、高速炉用動特性解析コードEXCURS⁵⁾を、NSRR用に改良したものである。この計算コードは、熱・流動計算及び核計算を行う。熱・流動計算についてはFig.3-3に示すようなユニットセルに対して固体領域では半径方向のみの熱移動、流体領域では固体領域からの熱移動と軸方向のエンタルピ一輸送を考えて、平均チャンネル、ホットチャンネル及び工学的高温点係数を考慮したホットテストチャンネルにつき数値計算を行う。核計算は、一点近似の動特性方程式に、平均チャンネルの熱計算結果に基づく反応度のフィードバック効果を考慮して数値計算するものである。

(2) オンラインシミュレータ

オンラインシミュレータは、炉心モデルは前者と同様に制御棒の移動による原子炉の応答を計算するが、制御回路および制御棒駆動装置（調整棒）は実際の原子炉運転用のものが使用される。システム構成をFig.3-4に、シミュレーション計算の概略をFig.3-5に示す。実機制御系から制御棒位置がシミュレータに送られ、それをもとにシミュレータで核計算及び熱計算が行われ、制御系に炉出力が返される。オンラインシミュレーションでは、平均燃料温度、投入反応度、フィードバック反応度、正味反応度、炉出力、積分出力が計算結果として出力される。燃料温度に関しては、オフラインシミュレータでは軸方向、半径方向ともに6点の計算を行っているのに対してオンラインシミュレーションでは軸方向1点、半径方向6点により計算を行っている。

なお、オンラインシミュレーションを行う際は、原子炉は停止状態であり、制御棒を切り離した制御棒駆動機構のみを駆動させる。

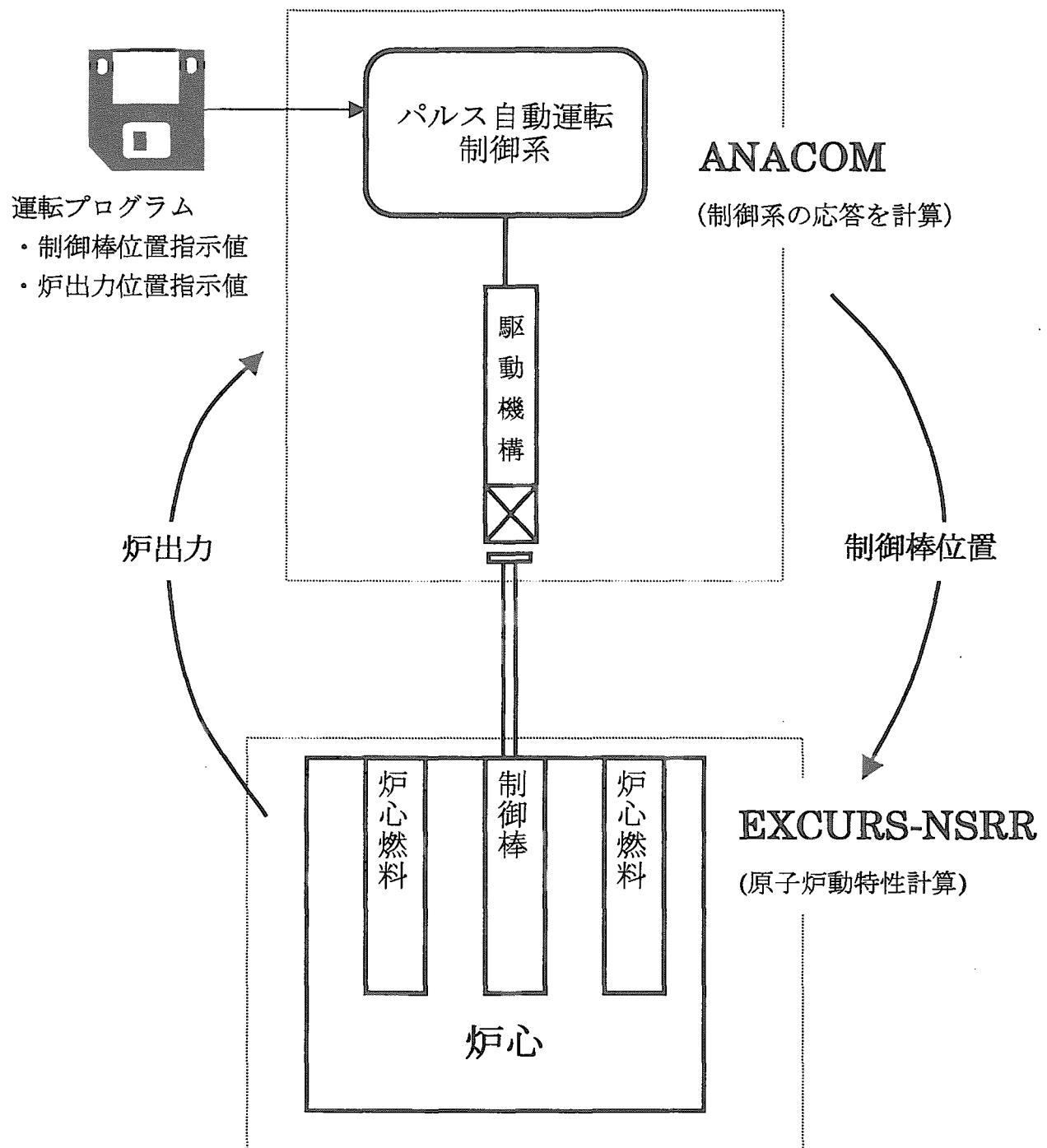


Fig.3-1 オフラインシミュレータの構成

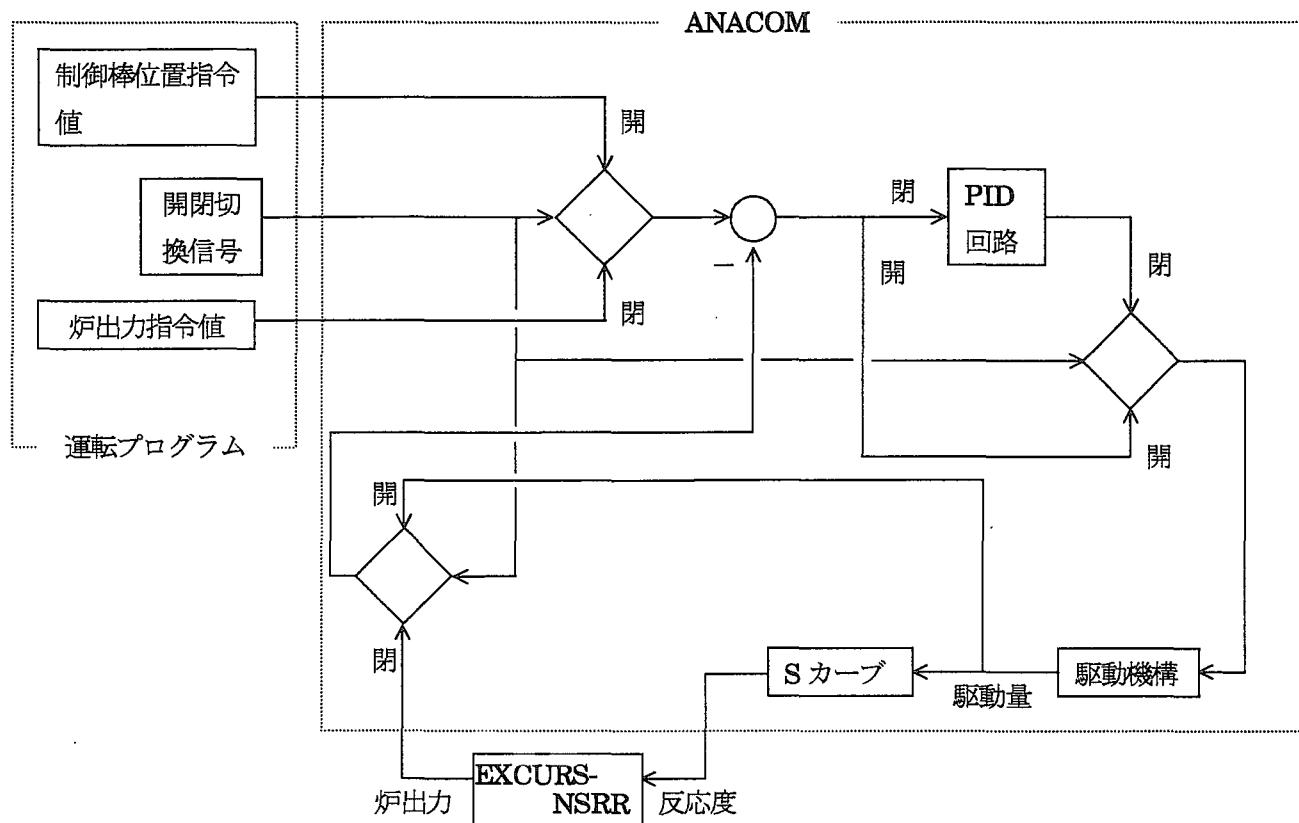
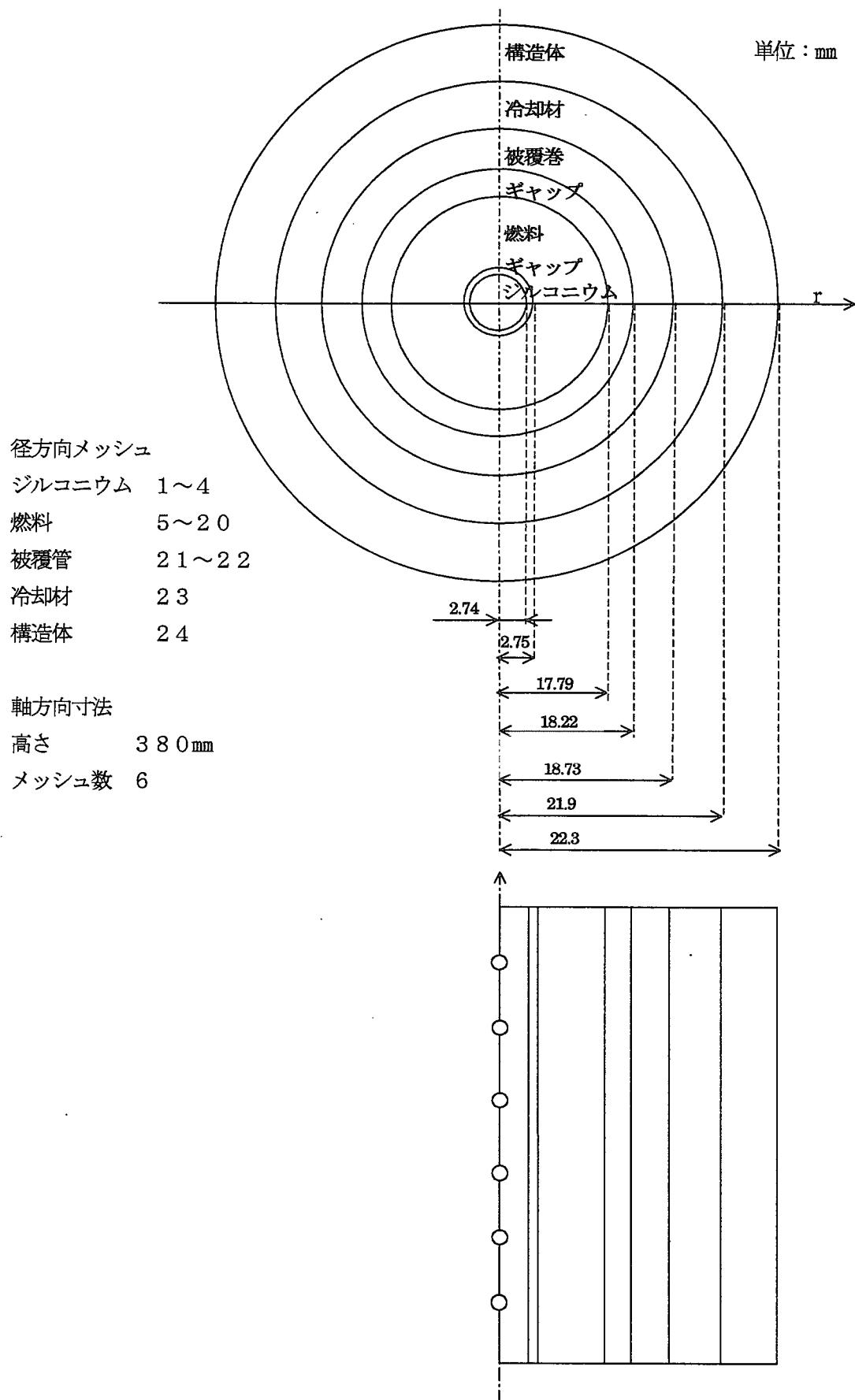


Fig.3-2 オフラインシミュレーションの流れ



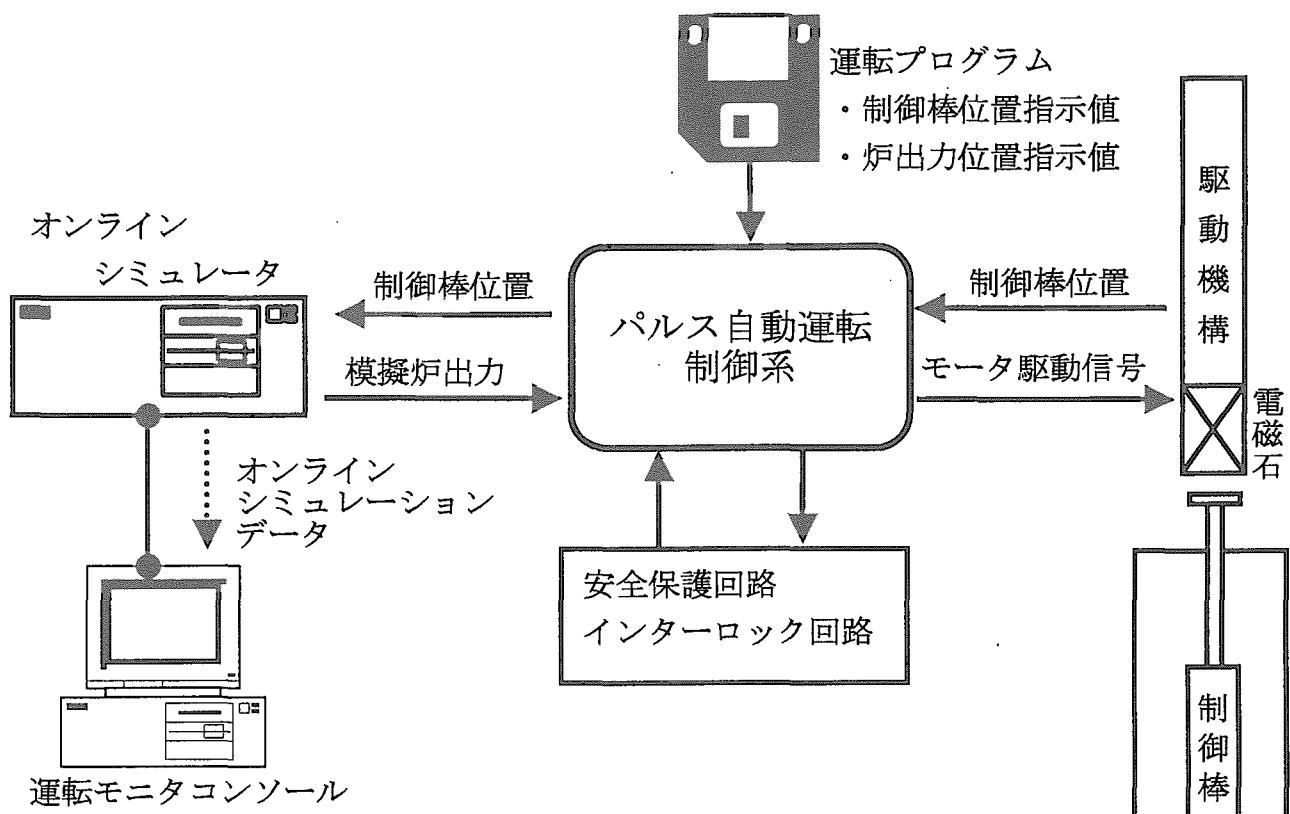


Fig.3-4 オンラインシミュレータの構成

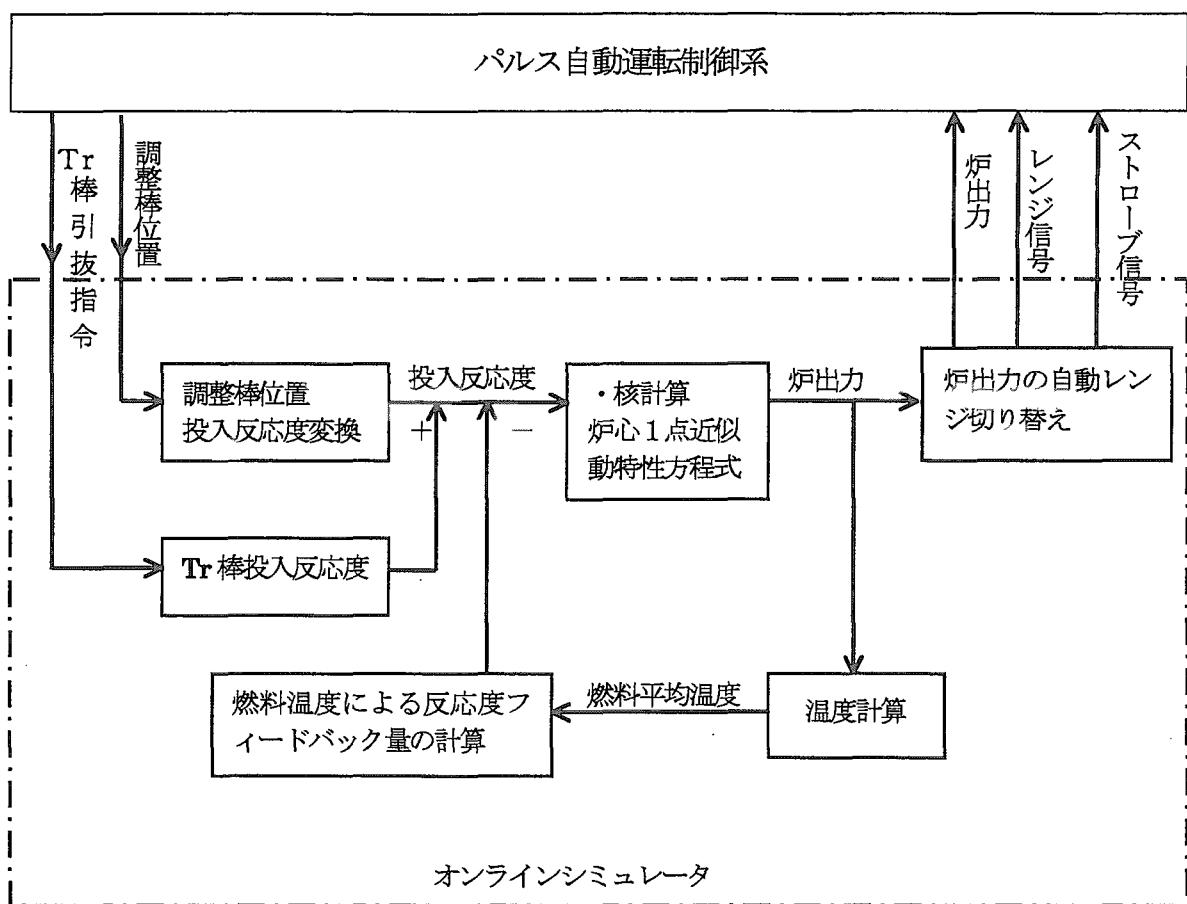


Fig.3-5 オンラインシミュレータの計算の概要

4. シミュレータの改良

4. 1 改良箇所

以下の点を改良した。

- 1) 反応度価値曲線の変更
- 2) 燃料温度フィードバック反応度計算式の変更
- 3) 燃料温度計算の時定数の導入

4. 2 改良内容

4. 2. 1 反応度価値曲線の変更

今回の改良では、シミュレーションプログラムで制御棒位置から反応度への変換に用いられた計算式を、平成12年に測定した反応度価値曲線の6次近似式に変更した。平成12年測定データ等の詳細は付録に示す。また、この結果を従来使用していた制御棒反応度価値表から求めた6次の近似曲線と比較した。その結果をFig.4-1に示す。再評価した反応度価値のほうが従来の曲線に比べて若干低くなった。

なお、反応度価値曲線についてはオンラインシミュレーション、オフラインシミュレーションともに同一の近似式を用いることとした。

反応度価値曲線変更後のオフラインシミュレーションと実運転の比較をFig.4-2に示す。

4. 2. 2 燃料温度フィードバック反応度計算式の変更

初期出力上昇部分のピーク出力履歴のシミュレータによる評価精度を向上させるために、反応度価値曲線の変更に加えて、燃料温度フィードバック反応度の計算式を変更した。

まず従来の反応度評価式でフィードバック反応度を計算し、この反応度に燃料温度 0~75°C、75°C~230°C、230°C~という3つの区分を設けた。ここで、75°Cは初期出力上昇 2MW 時のおおよその燃料温度、230°Cは 5MW 以上の高出力時の燃料温度である。

次に、従来の評価式から得られた各温度域における燃料温度フィードバック反応度を基に、NSRR 初期出力上昇部分の出力履歴をオフラインシミュレータで再現できるよう、パラメータサーベイを実施した。すなわち、従来の評価式を用いて求めた上記各燃料温度領域の燃料温度フィードバック反応度に対しそれぞれある係数を乗じ、係数を乗じた後の反応度を6次式でフィッティングしオフラインシミュレーションへと組み込んだ。そして、反応度に乗じる係数を変化させた数ケースについてオフラインシミュレーションを実施した。その比較結果をFig.4-3に示す。この結果から、従来の評価式から求めた燃料温度域 0~75°Cにおける燃料温度フィードバック反応度に対し、0.65 を乗じたものが最も妥当であると考える。

また、この場合の燃料温度フィードバック反応度の近似曲線をFig.4-4に示す。従来の評価式を用いた計算結果と比較して、燃料温度フィードバック反応度に大きな差は見られない。

4. 2. 3 燃料温度計算へ時定数の導入

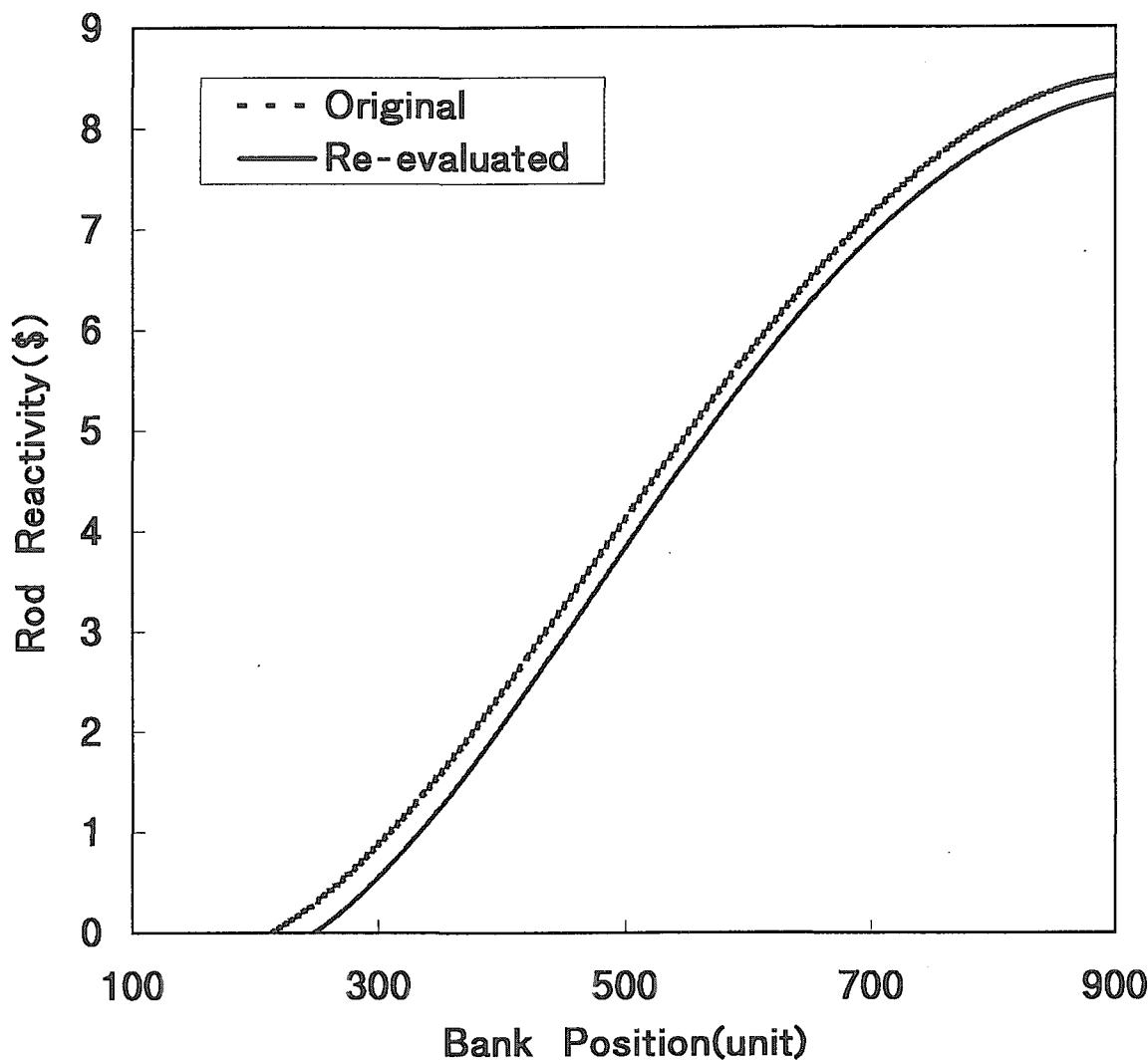
実測される燃料温度は熱電対による計測のため時間遅れが生じている。その時間遅れをオフラインシミュレーション上でも再現するために時定数⁵⁾を導入した。

Fig.4-5 に示す過去の NP 運転データをもとに時定数を求めたところ、**Fig.4-6** のように平均値は 0.5342s であった。この時定数を実測値に反映した値とオフラインシミュレーションの計算値を比較したところ、**Fig.4-7** のような結果となり十分な一致が見られなかった。これは、冷却材による除熱の影響や燃料と熱伝対のギャップコンダクタンス等、他のパラメータによる影響があると考えられるが、本件では、時定数に補正を加えて用いることとした。**Fig.4-8** に示すように、投入反応度毎に時定数をパラメータサーベイしたところ、**Table.4-1** に示す値が実測値を最も良く再現していることがわかった。ここから **Fig.4-9** のように投入反応度と時定数の関係式を求め燃料温度計算に反映することとした。

S P、C P 運転については、同一運転中において投入反応度が一定でないことから、前述の関係式を用いることは困難である。したがって、定数でこれを与えることとした。2、2.5、3s の場合についてオフラインシミュレーションと実運転を比較した。その結果を **Fig.4-10** に示す。この図から、実測値を最もよく再現しているのは時定数 2.5s の場合であることが分かる。したがって S P, C P 運転のオフラインシミュレータには 2.5s を採用した。

Table.4-1 時定数パラメータサーベイ結果

投入反応度 (\$)	時定数 (s)
1.49	2.0
2.01	1.9
3.13	1.7
3.50	1.5
4.00	1.1
4.50	0.8



Re-evaluated

$$\begin{aligned}
 y = & -7.49234 \times 10^{-17} x^6 + 2.73175 \times 10^{-13} x^5 - 3.58239 \times 10^{-10} x^4 \\
 & + 1.68822 \times 10^{-7} x^3 + 8.81577 \times 10^{-6} x^2 - 9.72197 \times 10^{-3} x + 4.12704 \times 10^{-1}
 \end{aligned}$$

x: バンク位置
y: 制御棒反応度価値

Fig.4-1 反応度価値曲線の比較

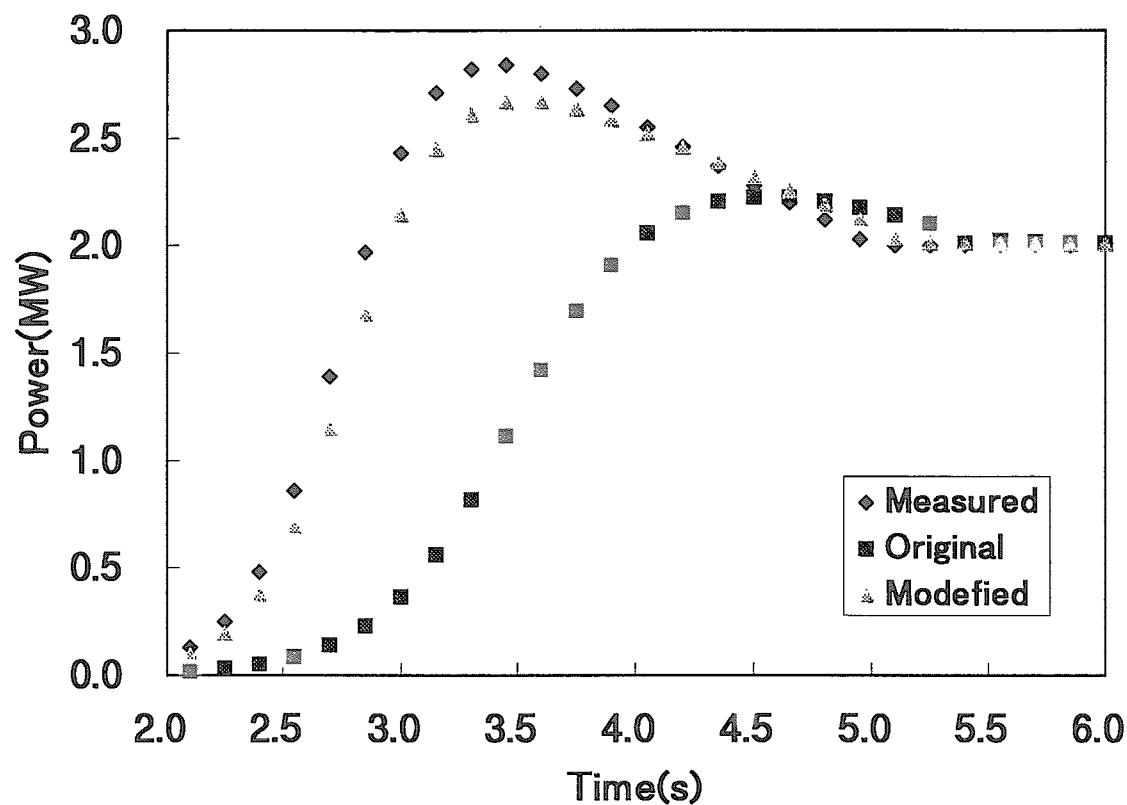


Fig.4-2 反応度価値曲線の変更による炉出力計算結果の比較

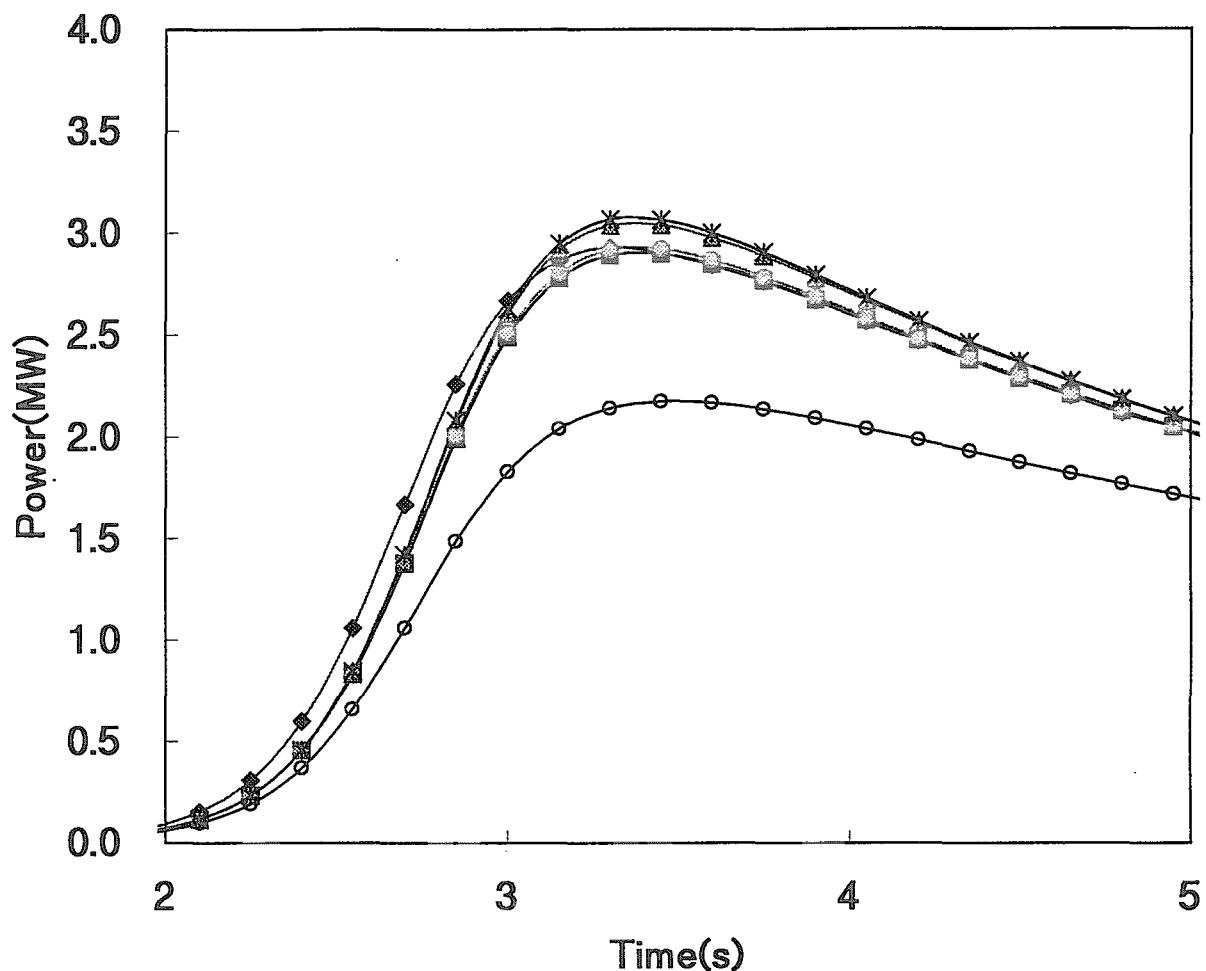
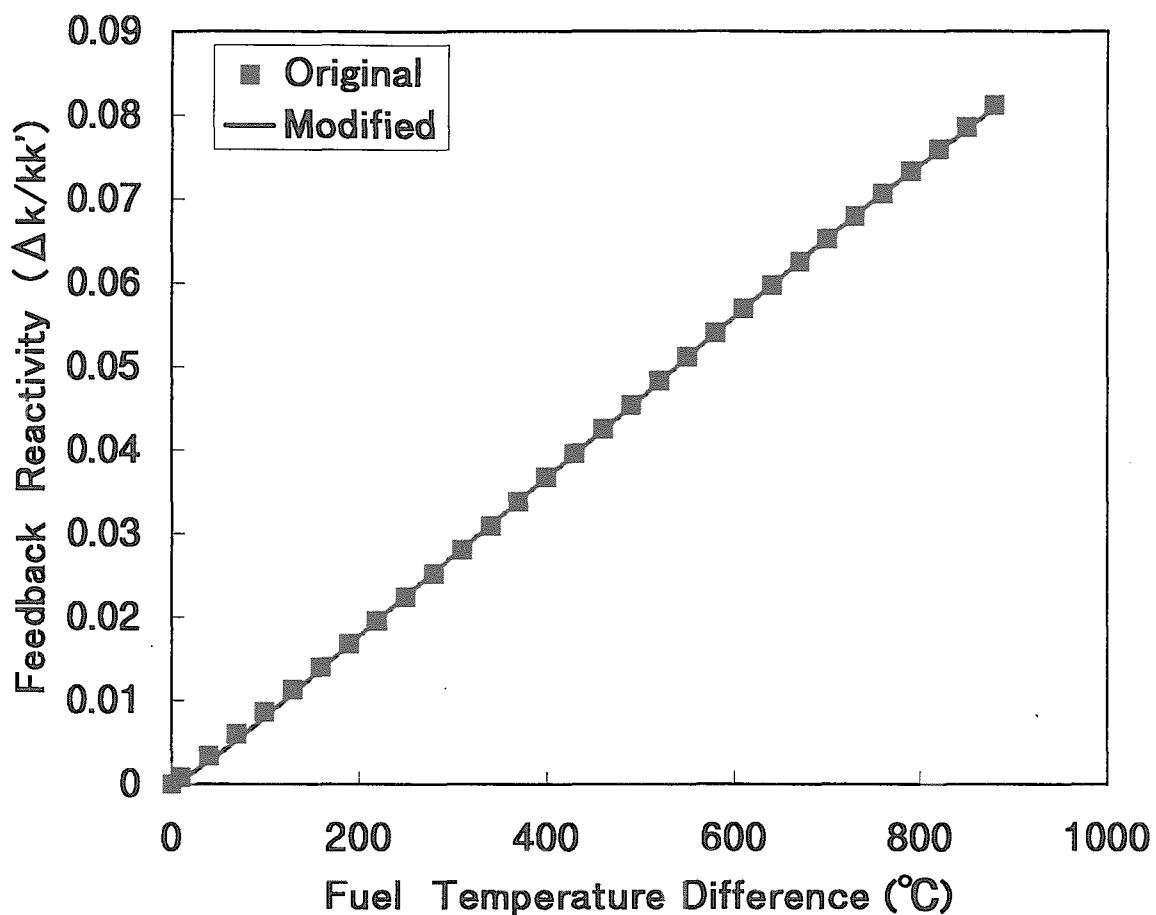


Fig.4-3 燃料温度フィードバック係数の比較

		燃料温度フィードバック係数		
		温度領域 I	温度領域 II	温度領域 III
実測	◆	—	—	—
計算値	○	× 1.00	× 1.00	× 1.00
	■	× 0.7	× 1.00	× 1.03
	▲	× 0.65	× 1.00	× 1.03
	◆	× 0.65	× 1.00	× 1.00
	*	× 0.6	× 1.00	× 1.00

(燃料温度領域, 温度領域 I : 0~75°C, 温度領域 II : 75~230°C, 温度領域 III : 230°C~)



Original

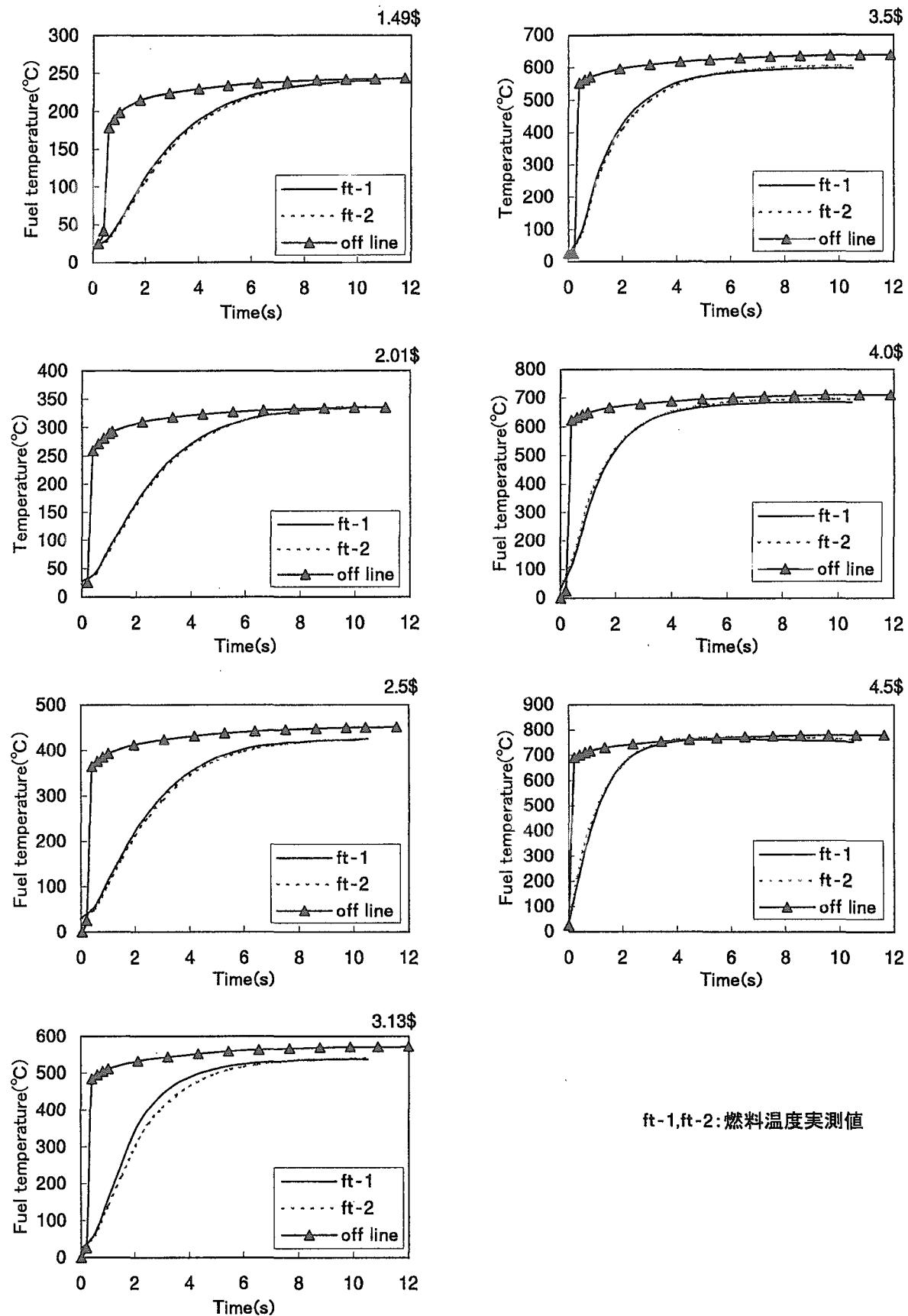
$$y = 2.3867 \times 10^{-11} (T^3 - T_0^3) - 3.25 \times 10^{-8} (T^2 - T_0^2) - 8.18 \times 10^{-5} (T - T_0)$$

Modified

$$y = 8.10907 \times 10^{-19} (T^6 - T_0^6) - 2.30860 \times 10^{-15} (T^5 - T_0^5) + 2.50574 \times 10^{-12} (T^4 - T_0^4) \\ - 1.30581 \times 10^{-9} (T^3 - T_0^3) + 3.35177 \times 10^{-7} (T^2 - T_0^2) + 5.71034 \times 10^{-5} (T - T_0)$$

y: フィードバック反応度($\Delta k/kk'$)T: 平均燃料温度($^{\circ}\text{C}$) T_0 : 初期燃料温度($^{\circ}\text{C}$)

Fig.4-4 新旧燃料温度フィードバック反応度の比較



ft-1,ft-2:燃料温度実測値

Fig.4-5 NP運転の実測とオフラインシミュレーションの燃料温度の比較

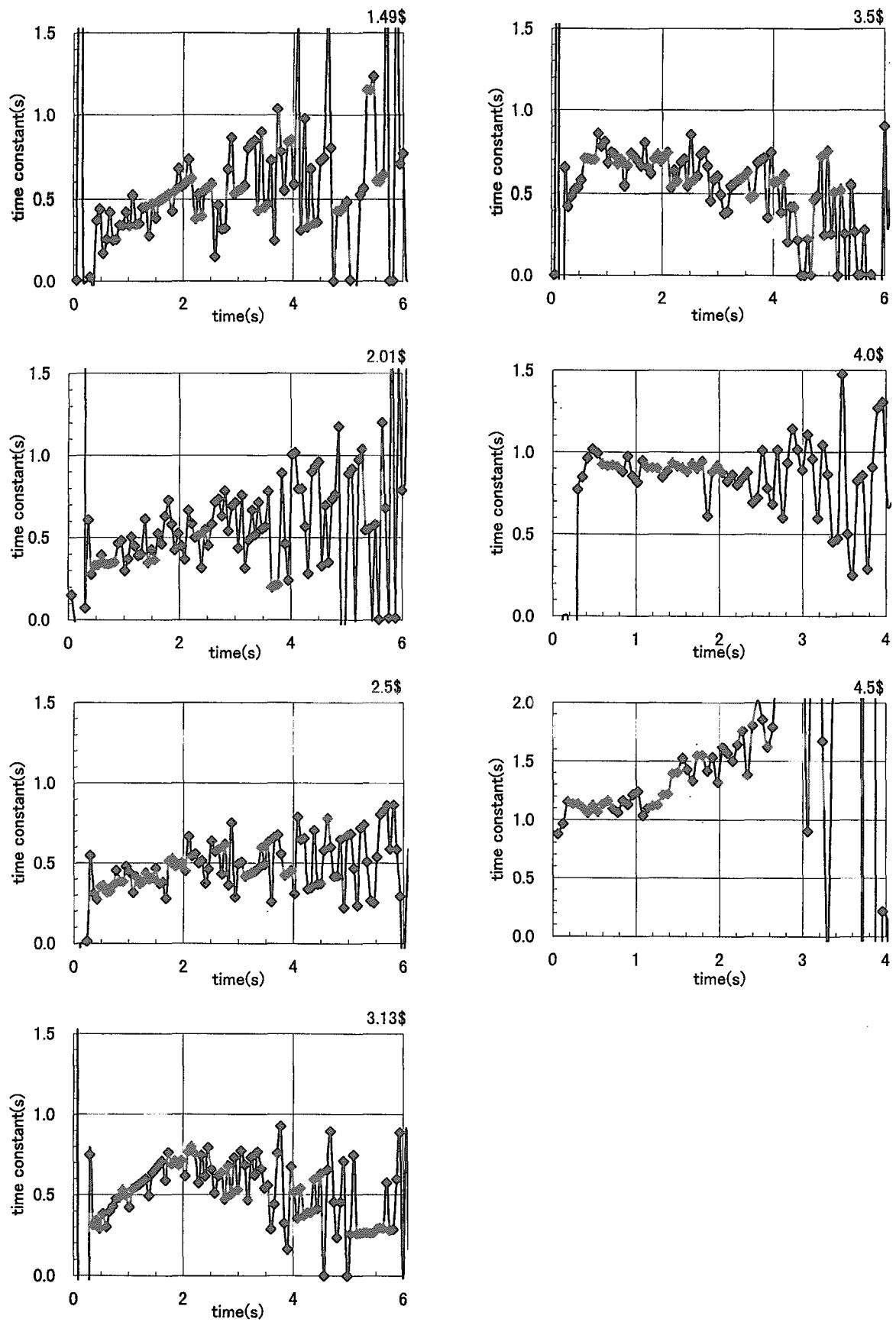
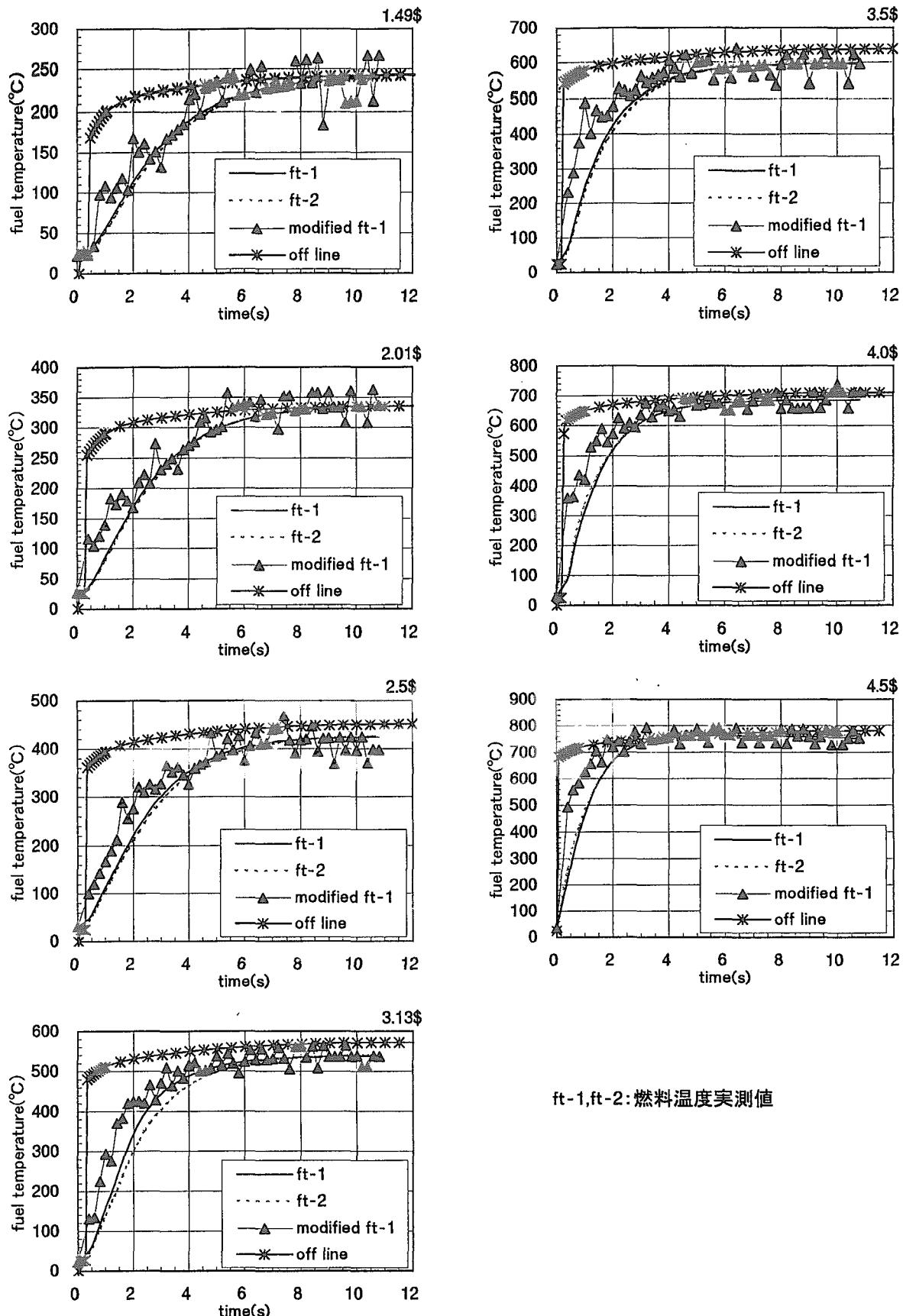
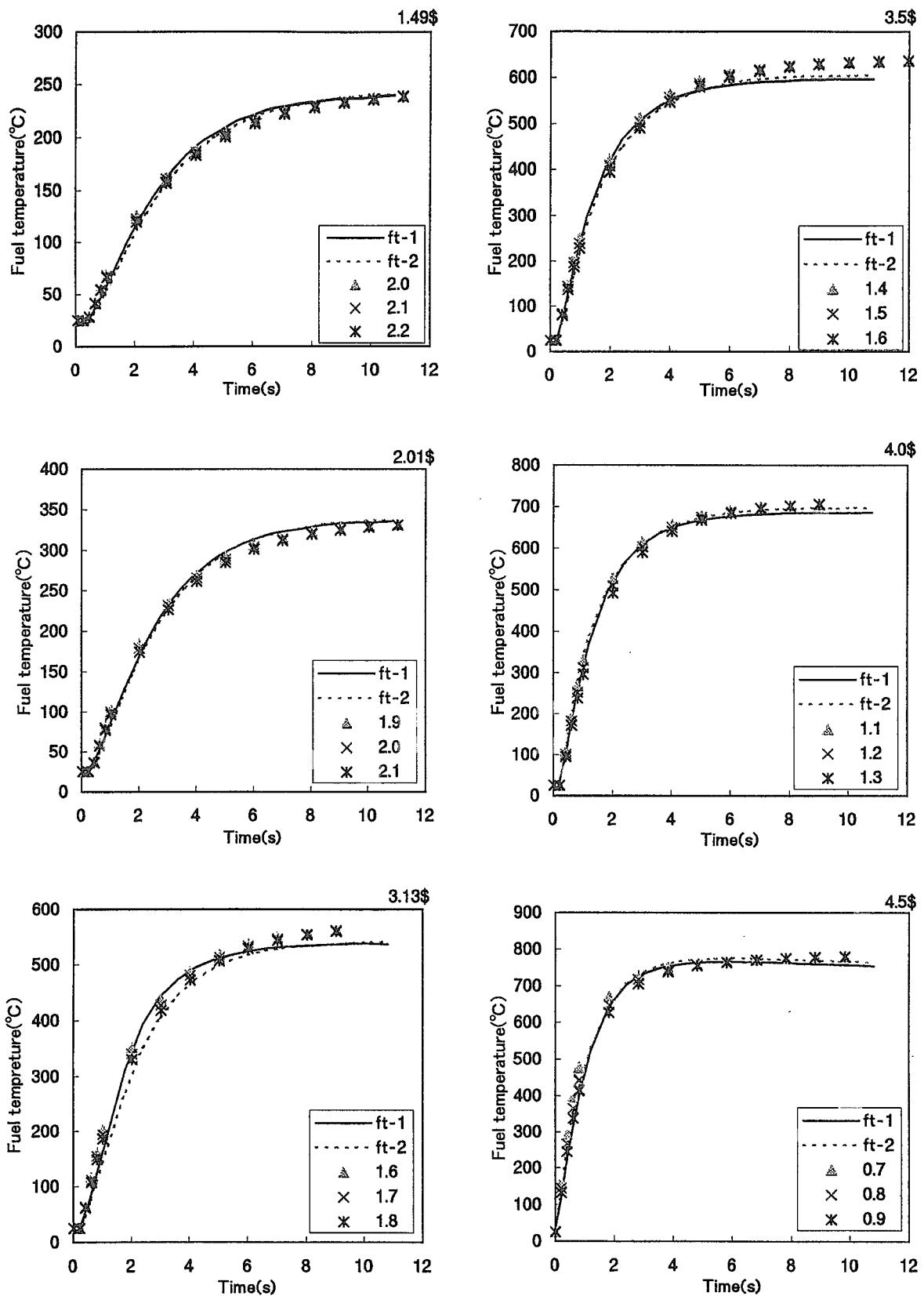


Fig.4-6 時定数計算結果



ft-1,ft-2:燃料温度実測値

Fig.4-7 時定数補正結果



ft-1, ft-2: 燃料温度実測値

Fig.4-8 反応度毎の時定数の選定

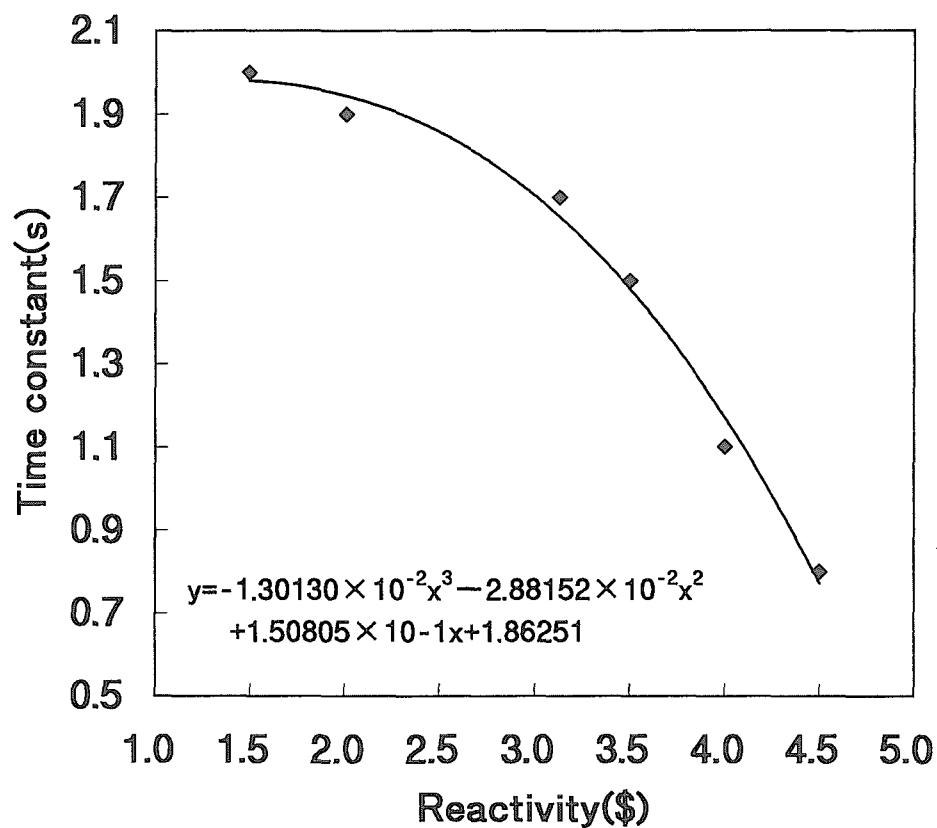


Fig.4-9 反応度と時定数の関係

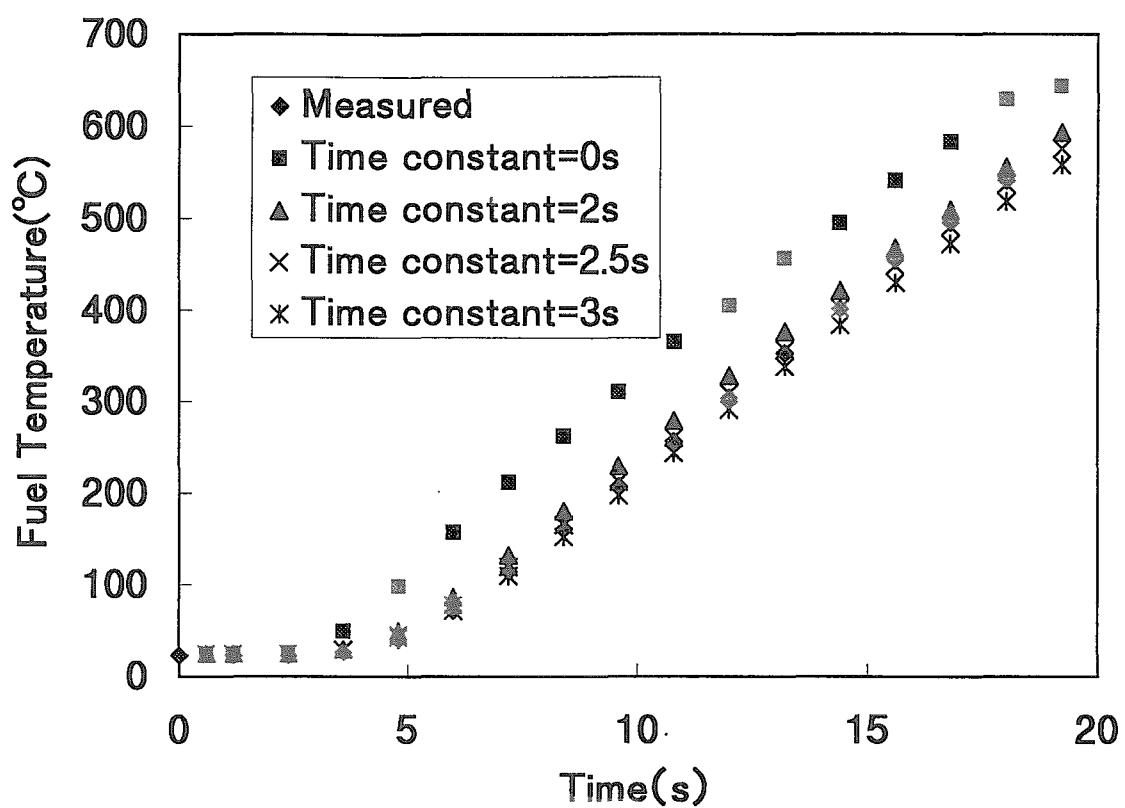
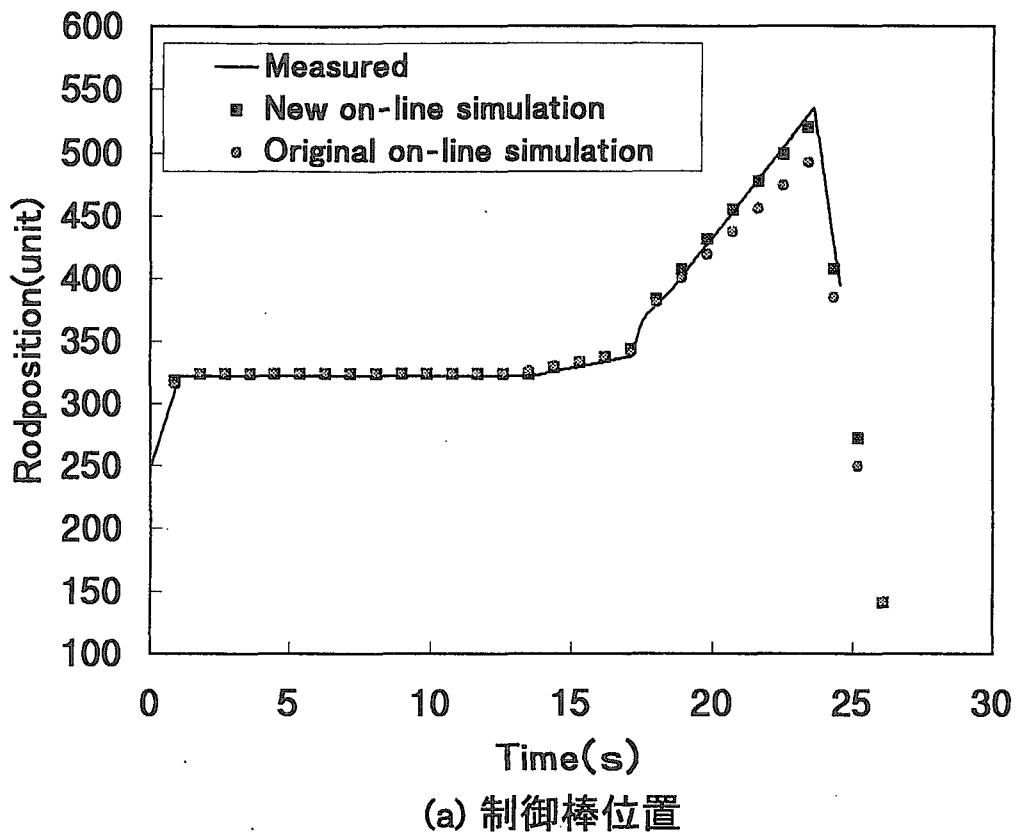


Fig.4-10 SP運転における燃料温度への時定数の影響

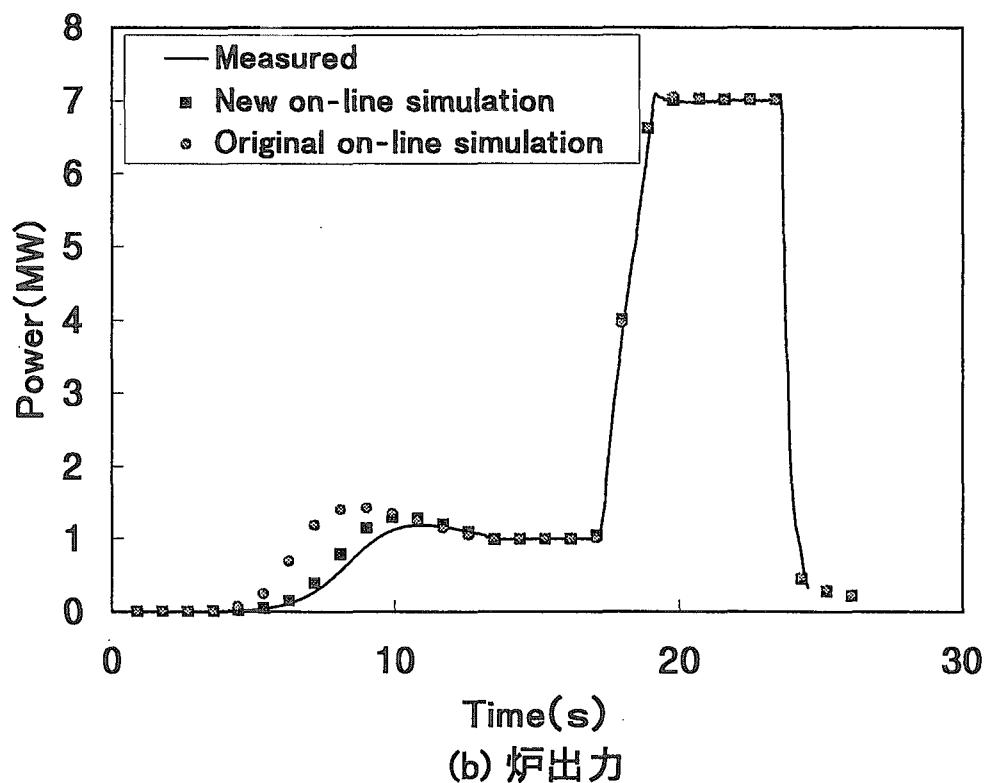
5. 確認運転

実運転と更新後のオンラインシミュレーション及び旧オンラインシミュレーションの比較を行つた結果を Fig5-1 に示す。また、実運転と更新後のオフラインシミュレーション及びオンラインシミュレーションの比較を行つた結果を Fig.5-2 に示す。

これらの結果から、更新後のシミュレータが、実運転を良く模擬出来ていることがわかる。



(a) 制御棒位置



(b) 炉出力

Fig.5-1-1 実運転と新旧オンラインシミュレーションの比較(SP01072602)

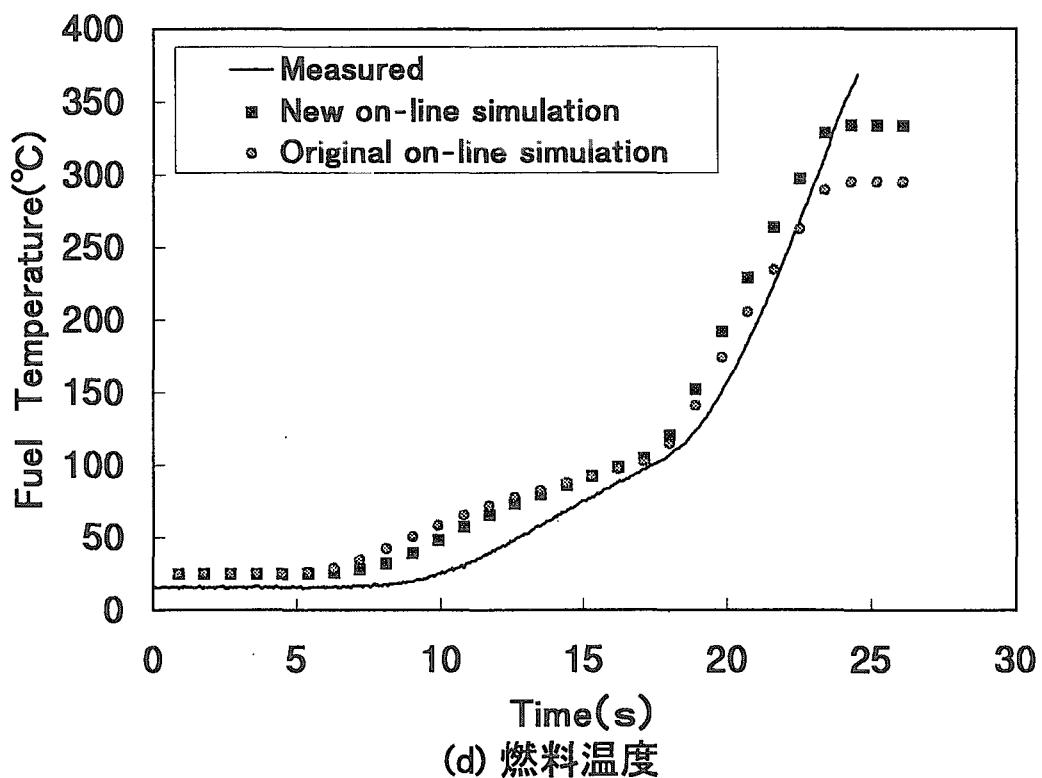
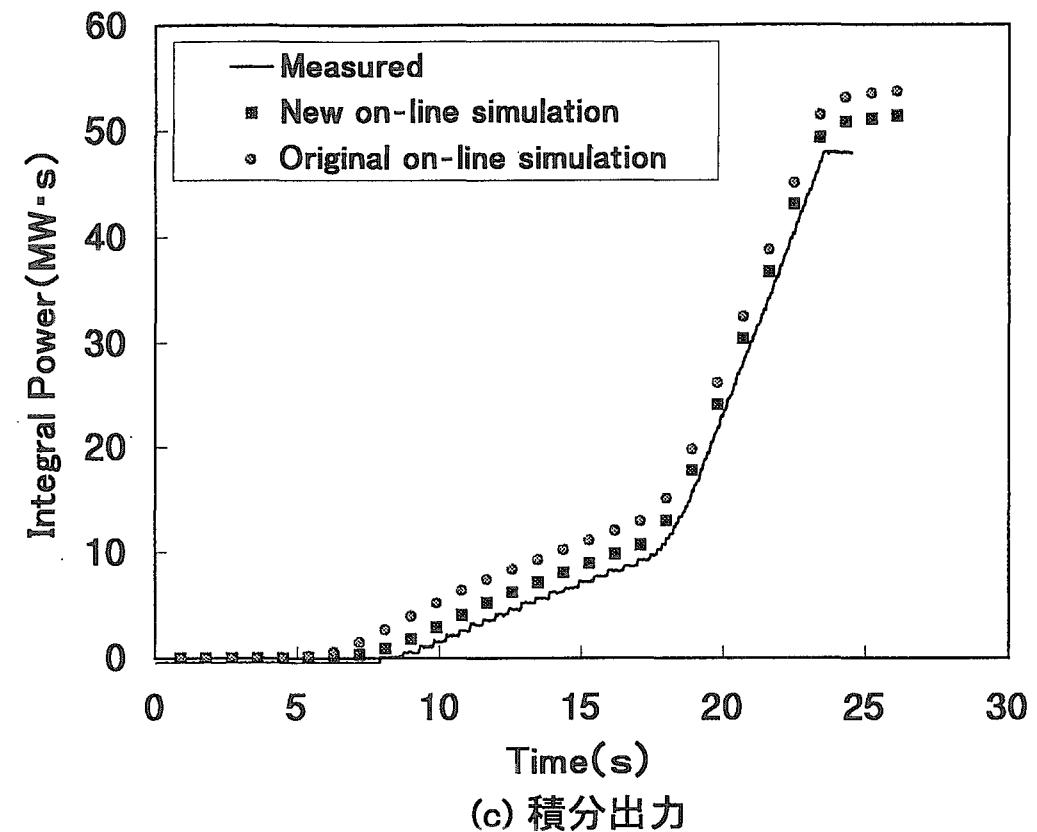
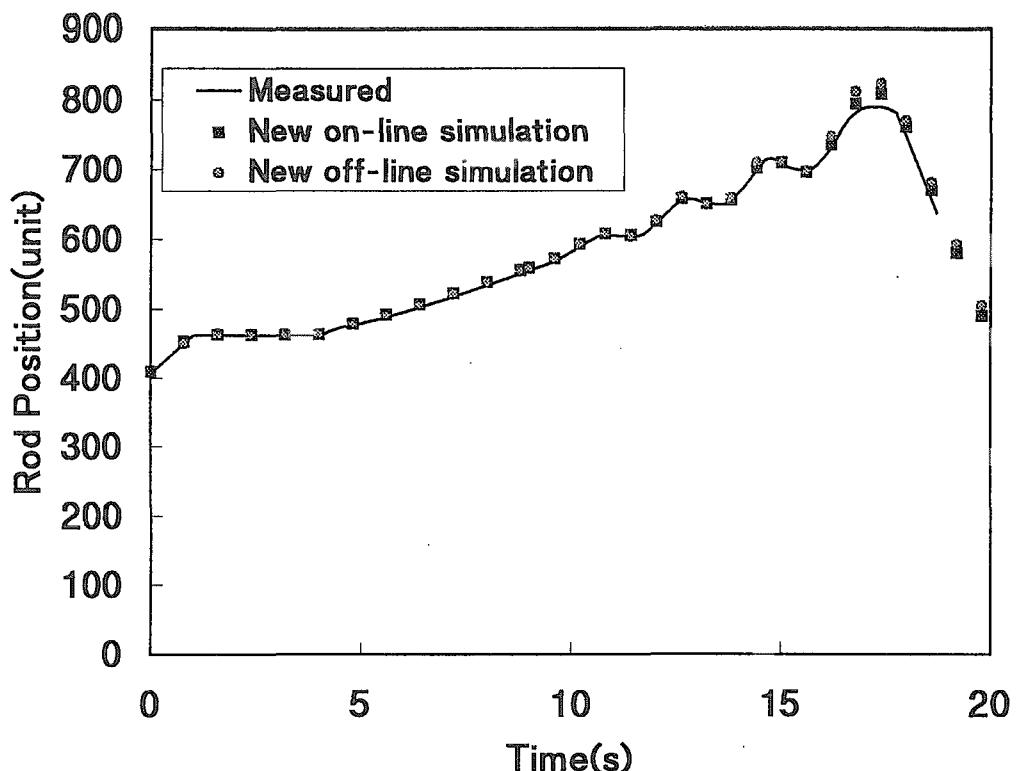
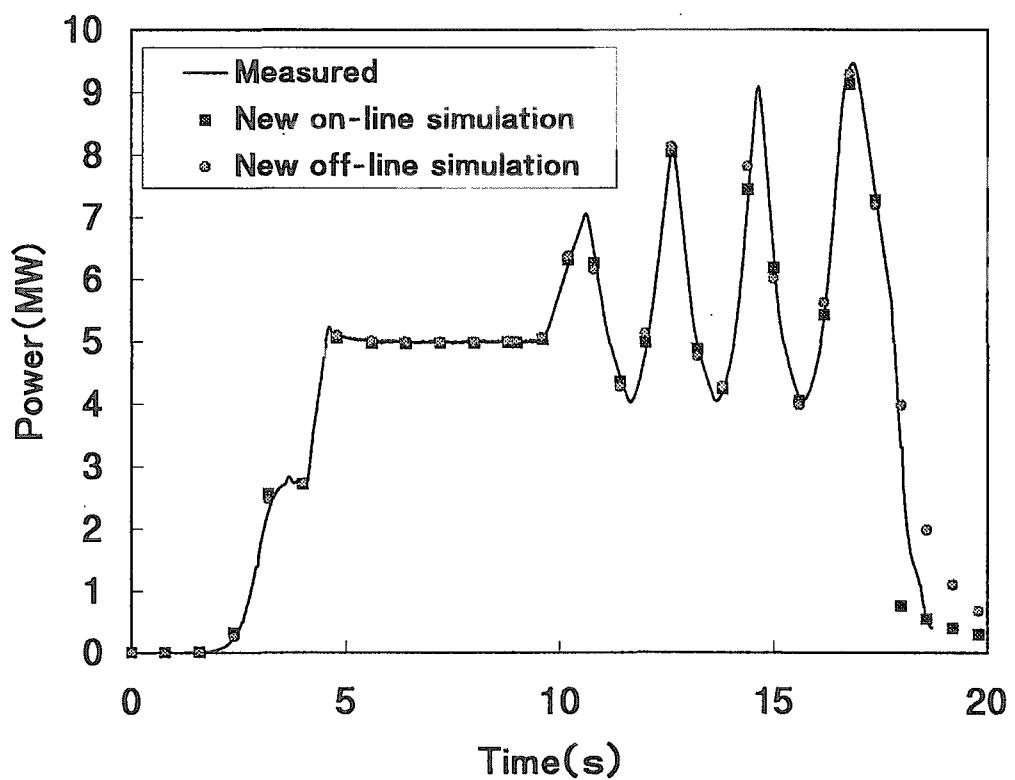


Fig.5-1-2 実運転と新旧オンラインシミュレーションの比較(SP01072602)

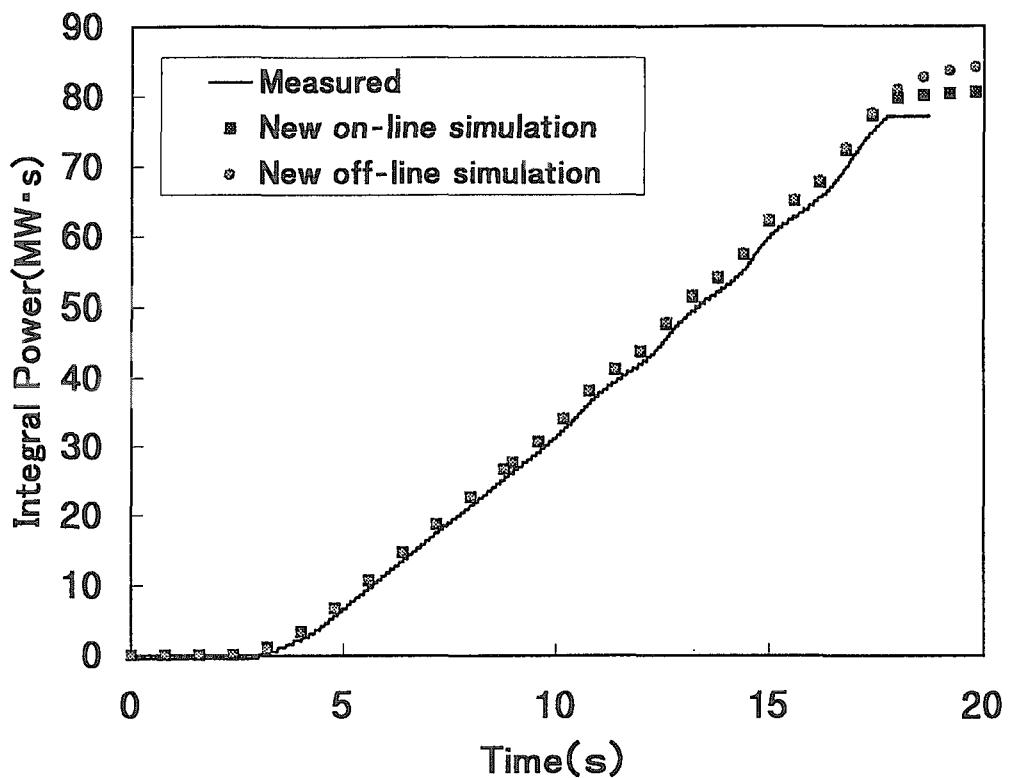


(a) 制御棒位置

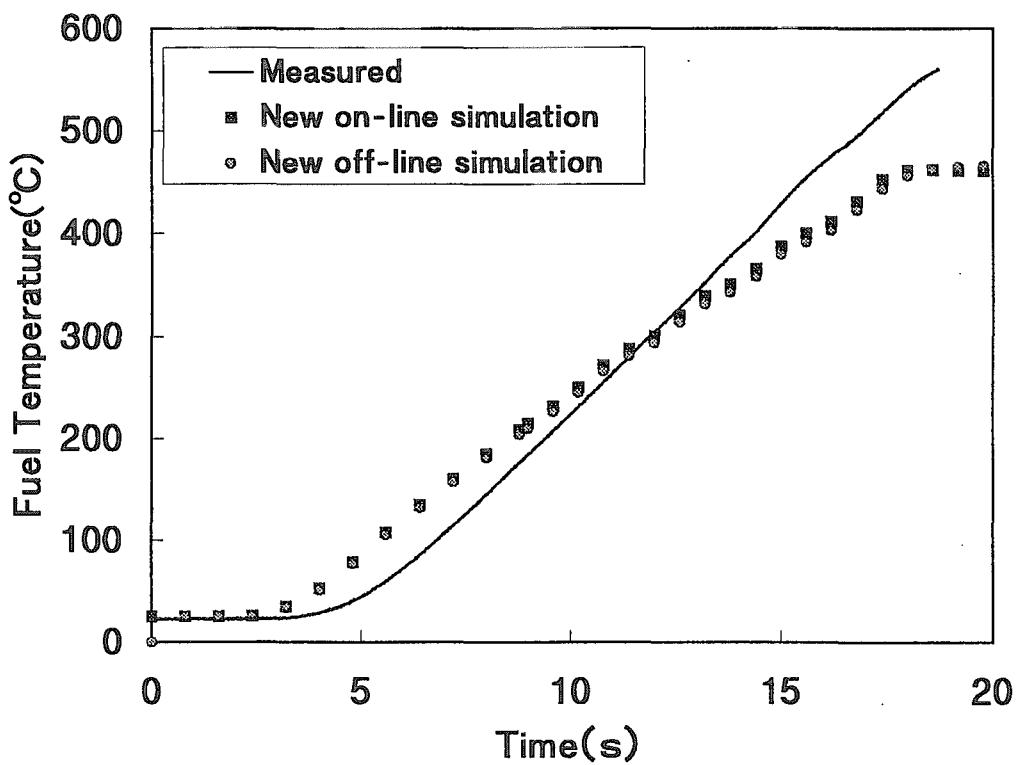


(b) 炉出力

Fig.5-2-1 実運転とオンライン、オフラインシミュレーションの比較(563-1)



(c) 積分出力



(d) 燃料温度

Fig.5-2-2 実運転とオンライン、オフラインシミュレーションの比較(563-1)

6. 考察

SP 運転の初期出力上昇部分の比較を行った。実運転及び更新後のオンラインシミュレーションの投入反応度に対するピーク出力、時間を Table.6-1 及び Fig.6-1 に示す。なお Fig.6-1 中の実線は、オンラインシミュレーションによる計算結果を多項式近似したものである。Fig.6-1 に示すように、オンラインシミュレータが実運転を良く模擬できていることが分かる。

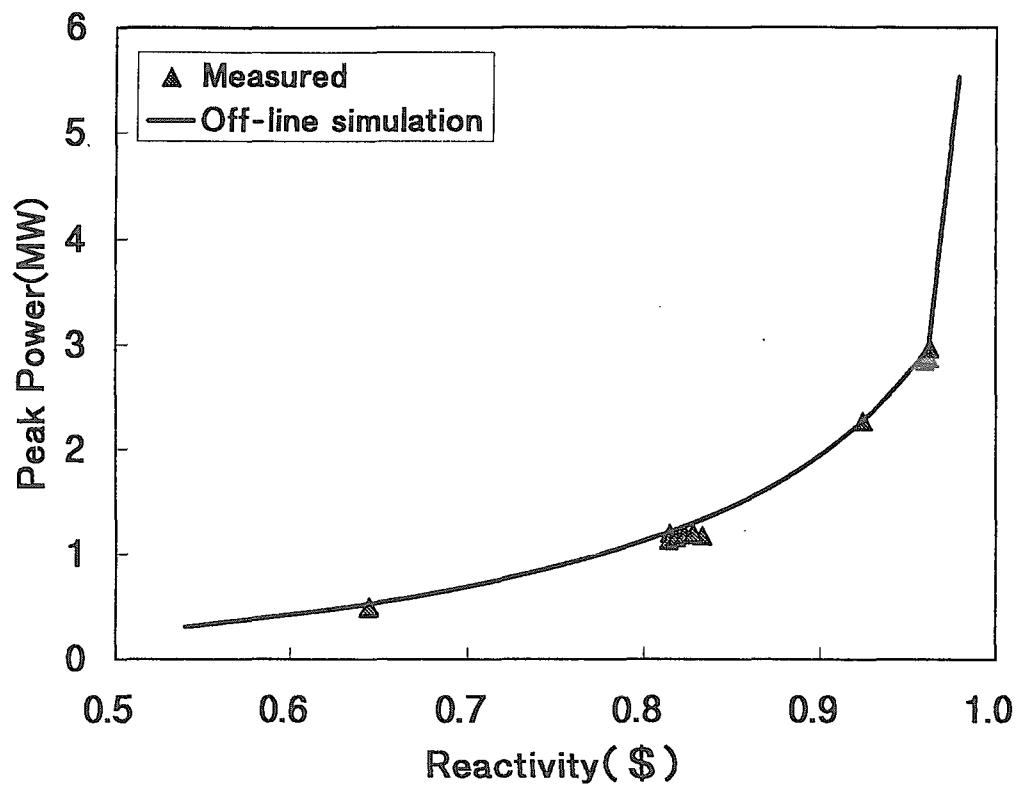
また、最近の SP 運転とオンラインシミュレーションとオンラインシミュレーションの立ち上げ部分の出力履歴を比較した。出力履歴の比較を Fig.6-2~3 に示す。これらからも更新後のシミュレータが、多少の差があるものの実運転を良く模擬できていることが分かる。両者の差は制御系の精度に起因するものと思われる。現在の制御系では、最大で目標制御棒位置 ±0.5unit 程の誤差が生じる。これは反応度にすると 2% 程度であり、各シミュレーションと実運転の間には多少の差が生ずる可能性がある。

運転終了間際の制御棒位置についても Fig.5-1,2 に示すように良く模擬できていることがわかる。ただし、Fig.5-1-1 のような実運転のほうが高くなる場合と Fig.5-2-1 のようなシミュレーションの方が高くなる場合とがある。この差は最大で 30unit 程度である。制限値 (852 ユニット) 近くまで制御棒が上昇する運転の場合は、シミュレーションより実運転のほうが低くなるため、仮にシミュレーションで制御範囲の上限近傍まで制御棒が移動したとしても、実運転で制御範囲の上限まで到達することはないと考えてよいが、実際にはシミュレーションでも制御範囲の上限までには余裕を持った運転プログラムを立てるべきである。

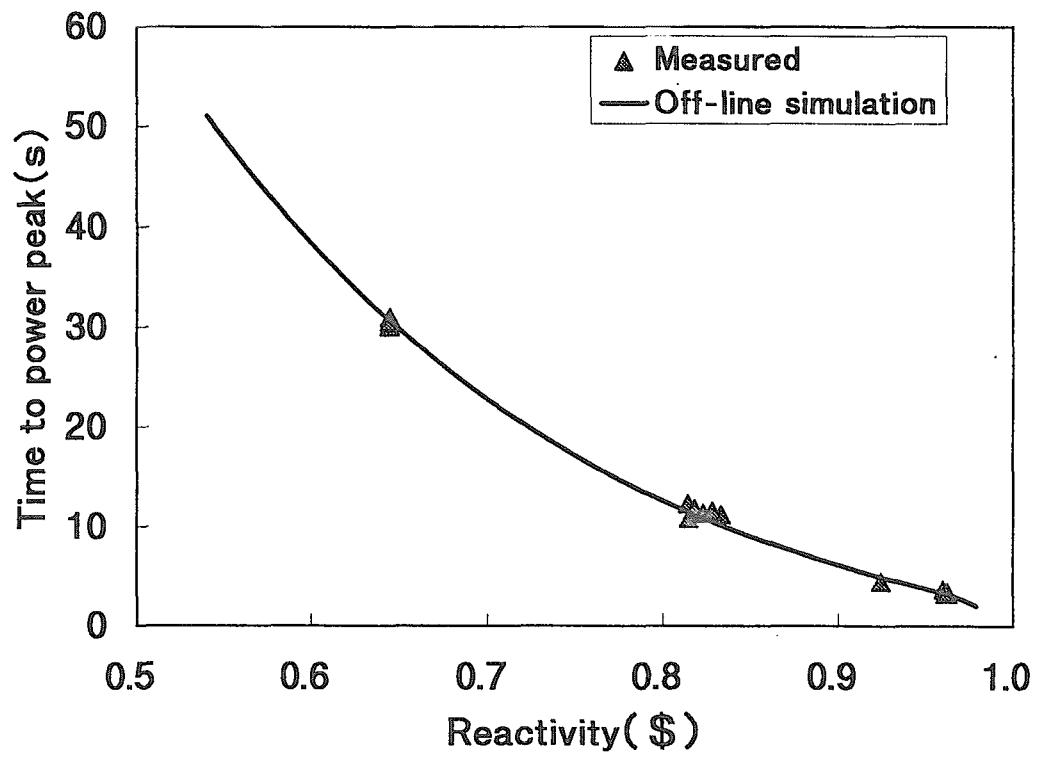
なお、減速材温度フィードバック反応度の影響についても調査した。Fig.6-4 に示すように反応度計算の減速材温度フィードバックの項の係数を大きくしたほうが制御棒の最高値が低くなる影響が現れることがわかった。このことから、この調整による、前段に述べた制御棒位置のずれの補正の可能性が示唆された。

Table. 6-1 最新のピーク出力・時間の計算結果

No.	運転No.	バック投入 反応度(\$)	ピーク出力		
			出力 (MW)	時間 (s)	燃料温度 (°C)
1	SP99081801	実測	1.128	12.38	48.3
	オフライン	0.814	1.207	11.64	65.0
2	SP99082002	実測	1.158	11.85	48.0
	オフライン	0.818	1.238	11.26	64.7
3	SP00072801	実測	1.184	11.40	39.6
	オフライン	0.823	1.269	10.89	64.3
4	SP00080301	実測	1.198	11.64	44.1
	オフライン	0.828	1.302	10.52	63.9
5	SP01082801	実測	1.176	11.48	38.4
	オフライン	0.833	1.335	10.17	63.6
6	SP01083001	実測	2.967	3.24	24.6
	オフライン	0.962	2.992	3.38	48.4
7	SP01083002	実測	2.868	3.45	24.6
	オフライン	0.962	2.992	3.38	48.4
8	SP01083003	実測	2.973	3.35	25.2
	オフライン	0.962	2.992	3.38	48.4
9	SP01083101	実測	2.962	3.29	24.9
	オフライン	0.962	2.992	3.38	48.4
10	SP01083102	実測	2.901	3.41	25.8
	オフライン	0.961	2.977	3.40	48.5



(a) ピーク出力



(b) ピーク時間

Fig.6-1 初期出力上昇時の投入反応度に対する最大出力及び最大出力までの時間

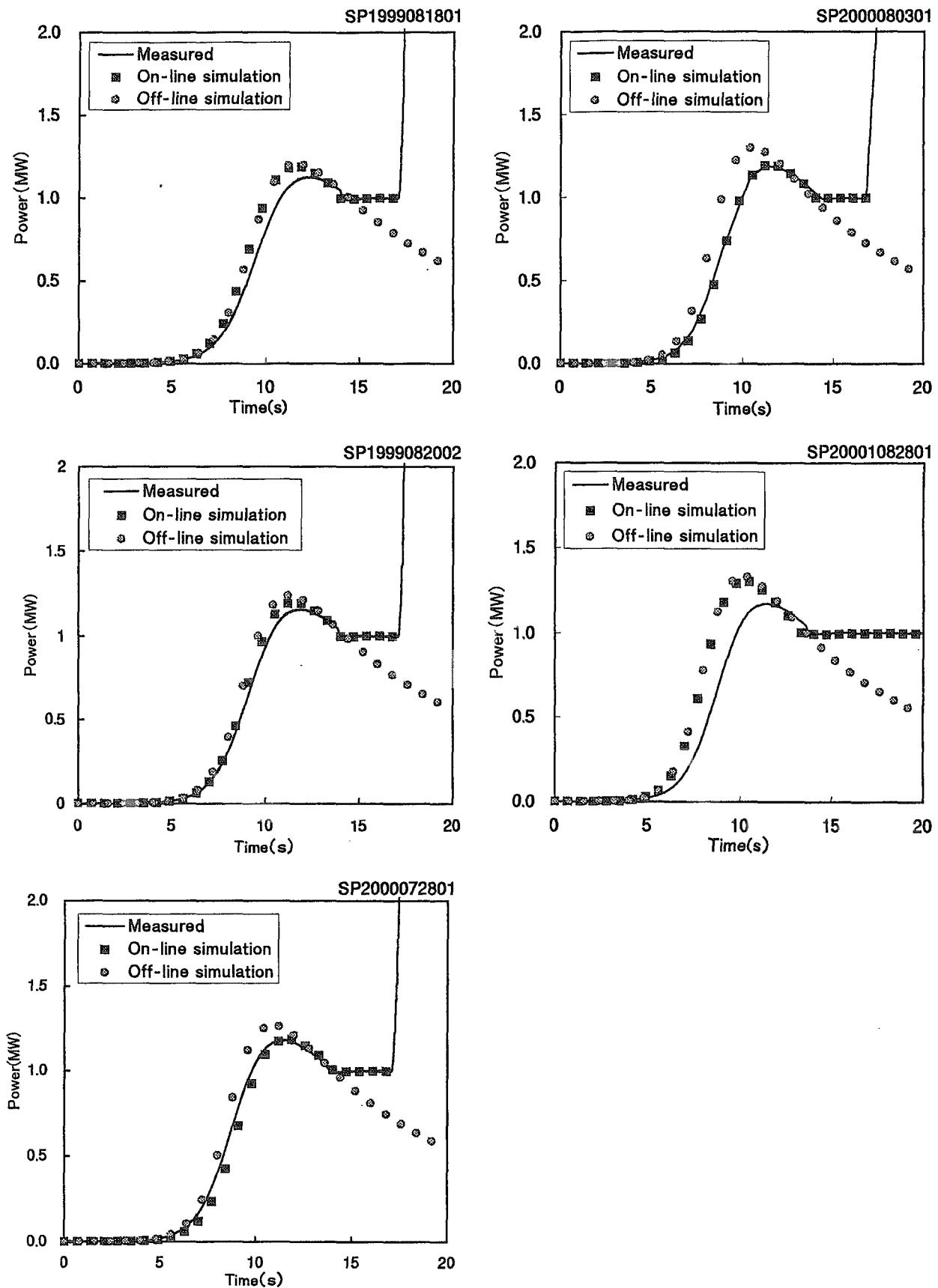


Fig.6-2 実運転、オンラインシミュレーション及びオフラインシミュレーションの出力比較

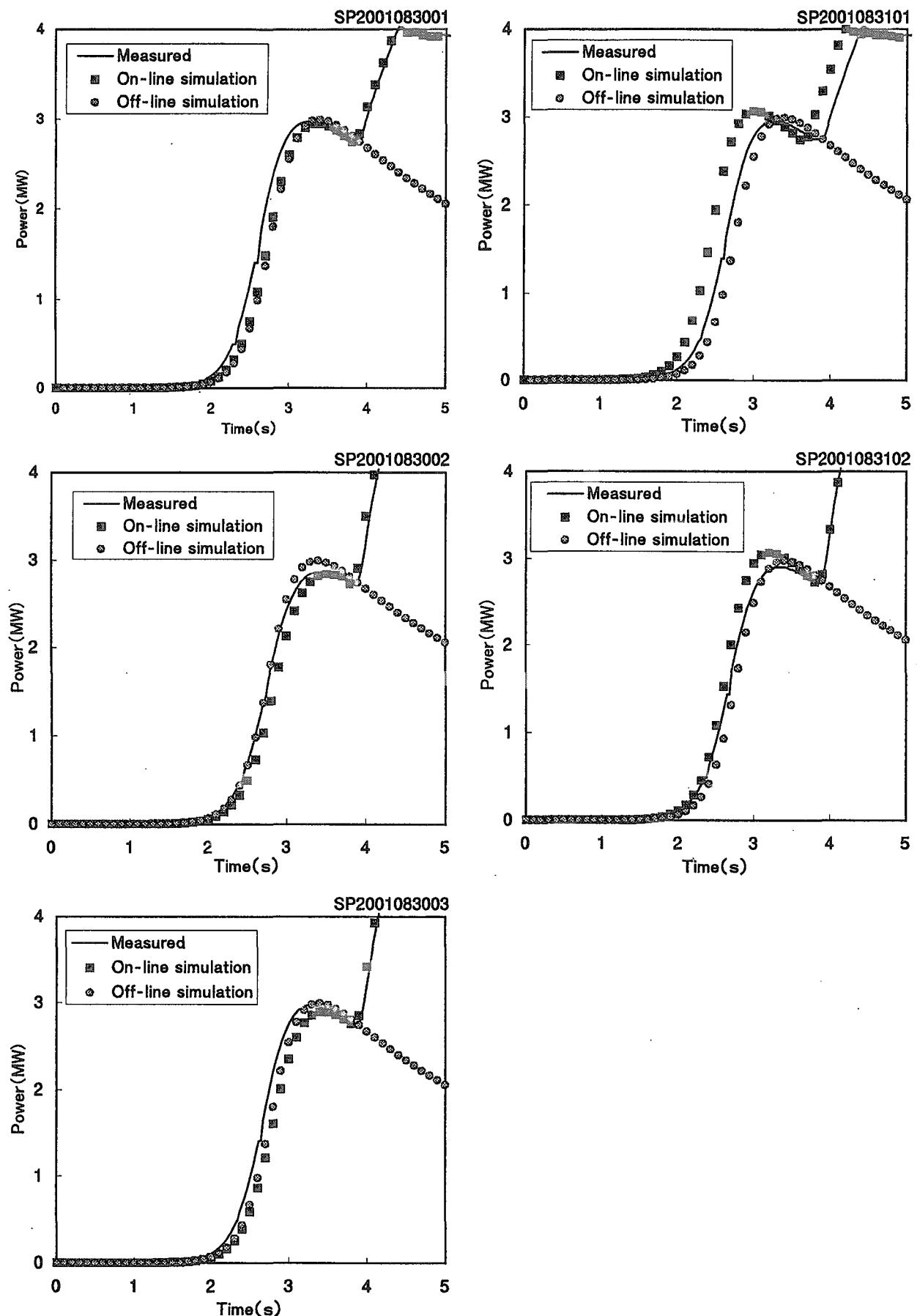


Fig.6-3 実運転、オンラインシミュレーション及びオフラインシミュレーションの出力比較

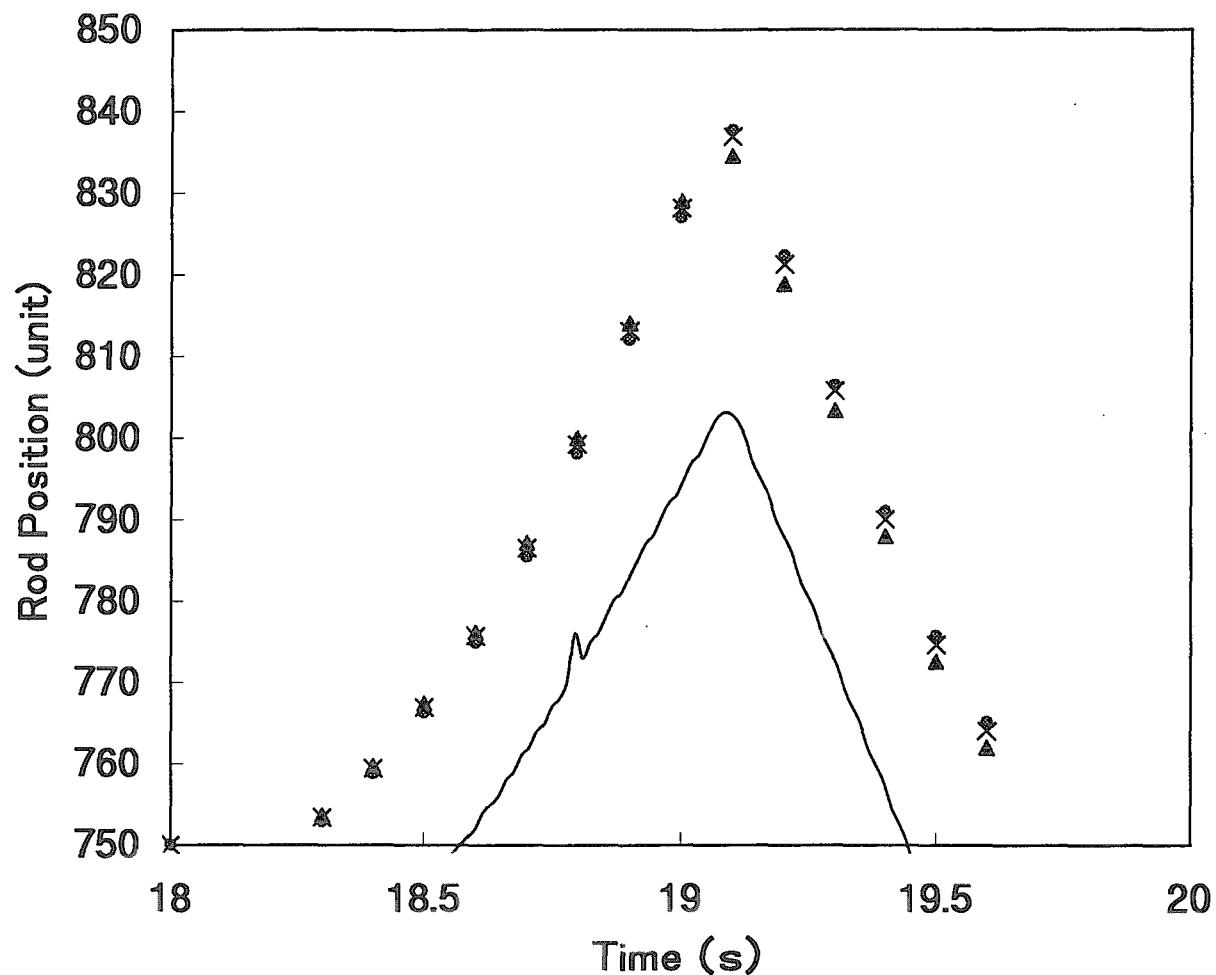


Fig.6-4 減速材温度フィードバック係数の制御棒位置に与える影響

		減速材温度フィードバック係数
実測	—	—
計算値	●	0.90
	×	0.95
	▲	1.10

7. まとめ

NSRR のオンライン及びオフラインシミュレータが実運転を十分再現できるよう、制御棒価値曲線と燃料温度フィードバック計算式を変更した。台形パルス (SP)、合成パルス (CP) 運転パターンでの特性試験を行い、これらのシミュレータの妥当性を確認した。今回の改良により、これらシミュレータの制御棒位置制御時の出力及び出力制御時の制御棒位置の予測精度が向上し、運転の自由度を向上することができた。

謝辞

今回のシミュレータ更新に当たっては、プログラム変更等において(財)高度情報科学技術研究機構の細山田龍二氏に多大な御協力を頂きました。また、多岐にわたり御協力頂いた燃料安全研究室、NSRR 管理室の諸氏に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1)稻邊輝雄、他：改良型パルス運転のための NSRR 計測制御系統施設の安全設計、JAERI-M88-113 (1988)
- 2) Takehiko Nakamura, Shoji Katanisi, Yoichi Kashima, Shigeyasu Yachi, Makio Yoshinaga, and Yoshibumi Terakado : High power transient characteristics and capability of NSRR Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.39, No.3, p.264~277, March 2002
- 3)石島清見、稻辺輝雄：NSRR ディジタル・シミュレータの開発、JAERI-M84-203 (1984)
- 4)藤城俊夫、石島清見、西郷正雄、上出俊夫、山本孝、田中修：原子炉安全性研究炉（NSRR）の計測制御系統施設の開発、FAPIG 第 123 号・1989-11
- 5) Shinzo Saito : Excurs-A computing program for analysis of core transient behavior in a sodium cooled fast reactor ,JAERI-M7280 (1977)

付録 制御棒反応度価値曲線測定データ

平成12年に調整棒の反応度価値を倍加時間測定法により測定した。調整棒6本をバンク操作（6本同時操作）により数十ユニット（20¢程度）引き抜いたときの、原子炉出力の倍加時間を測定し、逆時間方程式を用い反応度を求めた。調整棒を数十ユニット引き抜いた後は、トランジエント棒及び安全棒の挿入により臨界とする。その後、同様に調整棒を引き抜き、反応度を算出する。この操作を初期臨界点（測定時248ユニット）から900ユニット（上限）まで繰り返し行った。

調整棒位置(unit)	引き抜量(unit)	反応度(¢)	反応度変化率($\Delta k/\text{min}$)
268	20	19.2	0.0063
287	19	21.1	0.0073
303	16	19.1	0.0079
317	14	18.2	0.0086
332	15	21.6	0.0095
346	14	19.6	0.0092
359	13	19.2	0.0097
373	14	22.5	0.0106
386	14	21.4	0.0101
401	15	25.6	0.0112
414	13	22.0	0.0111
427	13	23.1	0.0117
440	13	23.0	0.0116
455	15	27.1	0.0119
466	11	20.7	0.0124
480	14	24.1	0.0113
492	12	22.6	0.0124
506	14	24.8	0.0117
519	13	23.0	0.0116
532	13	22.4	0.0113
546	14	22.9	0.0108
559	13	22.9	0.0116
573	14	23.5	0.0110
587	14	22.2	0.0104
602	15	24.5	0.0107
617	15	23.6	0.0104
632	15	23.1	0.0101
648	16	22.6	0.0093
665	17	23.6	0.0091
683	18	22.4	0.0082
702	19	22.5	0.0078
721	19	21.1	0.0073
743	22	21.9	0.0066
765	22	20.5	0.0062
792	27	21.9	0.0054
820	28	19.1	0.0045
846	26	14.0	0.0036
900	54	19.8	0.0025

This is a blank page.

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·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·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·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·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	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	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

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
バル	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

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

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

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

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

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

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

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

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

(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。

換 算 表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ポアズ)}(\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

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

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
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 erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	仕事率 1 PS(仏馬力) = 75 kgf·m/s = 735.499 W
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	
9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹		= 4.184 J (熱化学)
3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁶		= 4.1855 J (15 °C)
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹		= 4.1868 J(国際蒸気表)
1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹		
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸		
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	線量当量	Sv	rem
	1	3876		1	100
	2.58 × 10 ⁻⁴	1		0.01	1

(86年12月26日現在)

二の壁紙のヒント ハーフペーパーの活用

R100
古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています。