



高速実験炉「常陽」運転経験報告書

B5D-1 照射試験時の運転経験

1991年11月

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

高速実験炉「常陽」運転経験報告書

B 5 D - 1 照射試験時の運転経験

埜 幹男* , 大久保利行* , 星野 勝明*
村上 隆典* , 早川 晃* , 青木 裕*
照沼 誠一*

要 旨

本報告書は、高速炉燃料の設計因子の妥当性を実験的に確認するために1991年6月に実施した高線出力試験その1（B5D-1照射試験）時のプラント運転経験について述べたものである。

本照射試験は、試験体を炉心中心に装荷し、原子炉出力60MWから通常の4倍の出力上昇率（0.4MW/min）で95MWまで上昇させ、10分間保持した後急速に出力降下する方法で実施した。

試験時の主なプラント特性は次の通りである。

- (1) 60MWから95MWまでの平均出力上昇率は0.45MW/minとなり、その間の原子炉出口Na温度上昇率は37℃で、運転制限値を満足した。
- (2) 原子炉出口とオーバーフロータンク間のNa温度差は運転手法によって最大で70℃に抑えることができ、運転制限値を満足した。
- (3) 急速な出力変化に伴う2次Na温度制御系の追従性は良好で原子炉入口Na温度を一定に保持した。

今回の運転経験によって今後数回に渡り計画されている高線出力試験の運転手法をほぼ確立することができた。また、今回の運転データ及びシミュレータによる解析結果から運転制限値を満足する最大出力上昇率は約0.6MW/minと予測される。

* 実験炉部原子炉第一課

目 次

1.	緒 言	1
2.	B 5 D - 1 照射試験の概要	2
2. 1	試験目的	2
2. 2	試験体	2
2. 3	試験方法	3
2. 4	試験時の制限条件	3
3.	B 5 D - 1 照射試験時のプラント操作及び運転特性	1 1
3. 1	試験時のプラント操作	1 1
3. 2	原子炉出力上昇・下降時の運転特性	1 2
3. 3	試験時のプラント状態	1 3
3. 4	試験時の運転制限値	1 3
4.	プラント運転制限値の検討	1 9
5.	結 言	2 2
6.	参考文献	2 3
7.	付 録	2 5

B 5 D - 1 照射試験に際しての予備試験

1. 緒 言

高速増殖炉は、現在、世界的に研究開発段階を経て実用化を目指す段階にある。開発の初期段階では、一般に過度な安全余裕を持たせた設計が成されるが、軽水炉と競合し得る発電原価が要求される実用化段階では、過度に保守的な設計余裕を削減し、適切な安全余裕度を持った合理的な設計を行う必要がある。

高速増殖炉用燃料についても、現在、過度に保守的な設計が行われており、高速増殖炉の実用化の観点から設計余裕の適正化が強く望まれている。

このため、高速増殖炉用燃料の線出力と燃料ペレットの溶融との相関に関する各種設計因子の妥当性について、原子炉での実験的知見を得ることを目的とし、「常陽」を用いた高線出力試験を実施する。

本試験の成果によって、高速増殖炉用燃料の最大許容線出力が増加すれば、相対的にコンパクトな炉心及び原子炉とすることができ、プラントコストの低減化を図ることが可能となる。

高線出力試験は、燃料の組織変化の少ない燃焼初期における溶融限界線出力を求める必要があるため、試験体の溶融限界線出力まで極力急速に出力上昇させ、短時間の照射を行った後急速に出力を降下させることが要求される。従って、本試験においては試験体の設計・製造のほか計画通りの出力パターンで照射することが試験成功の鍵となる。

今回のB5D-1照射試験は、出力上昇速度が通常の4倍の0.4 MW/min、目標出力95 MWで10分間保持の条件で実施された。「常陽」では、1987年に高速増殖原型炉「もんじゅ」の原子炉出力上昇法策定の一環として実施したB4M照射試験において同じ出力上昇速度を経験している。このため、B4M照射試験の経験を参考にし、更に今回目標出力上昇率を確保するための制御棒操作量の予測と目標出力到達精度等を確認するための予備試験を実施して対応した。その結果、極めて安定したプラント状態を保持し計画通りの運転を行うことができた。高線出力試験は、平成3年度から数回に渡り実施される計画であり、今回のB5D-1照射試験の運転経験によって今後の試験を安全に実施できる見通しを得ることができた。

2. B5D-1 照射試験の概要

B5D-1 照射試験は、1991年6月17日に原子炉出力9.5Mwt で10min 間の照射をもって終了した。これに係わるプラント操作は、第23' サイクルとして6月16日から17日に掛けて実施され、原子炉起動、系統昇温、出力上昇、原子炉出力9.5Mwt で10min保持、出力降下、系統降温、原子炉停止であった。以下にB5D-1 照射試験の概要について記述する。

2.1 試験目的

高速増殖炉用の燃料設計に於いては、現在まで過度に保守的な設計が行われており、高速増殖炉の実用化の観点から設計余裕の適正化が強く望まれている。このため、燃料仕様をパラメータに燃料中心溶融試験を行い溶融限界線出力とこれに及ぼす燃料仕様パラメータの影響を直接的に確認するとともに、ギャップコンダクタンス、燃料組織変化等、燃料初期の燃料挙動を把握することを目的とする高線出力試験を数回に渡り実施する計画となっている。また、燃料溶融限界出力試験は「常陽」では初めてであり、本試験の実施により試験技術の確立を図ることも目的の1つである。

今回のB5D-1 照射試験は、高速増殖炉用の燃料設計に於ける線出力と燃料ペレットの溶融に関する各種設計因子の妥当性について、原子炉での実験的知見を得ることを目的として、試験用燃料ペレットの中心を溶融（ペレット断面積の20%以下）させる。

2.2 試験体

B5D-1 照射試験に使用する高線出力試験用集合体の構造を図2.1に示す。高線出力試験用集合体は、コンパートメントタイプのB型特殊燃料集合体と同様な構造となっており、ハンドリングヘッド、エントランスノズル、軸心管、コンパートメント及びコンパートメント支持機構等から構成される。軸心管は、正六角形断面のラップ管の中央に配置されコンパートメントは軸心管のまわりに等間隔に6本配置される。このコンパートメントには、特殊燃料要素を4本収納している。

高線出力試験用集合体は、この特殊燃料要素4本を収納したコンパートメント1本とダミー要素を収納したコンパートメント5本を装荷する。

特殊燃料要素には、被覆管に燃料ペレット、熱遮蔽ペレット、要素反射体（上、下）、プレナムスプリング及びプレナムスリーブ等を挿入し、両端に端栓を溶接した密封構造と

し、内部に不活性ガスを封入したものである。高線出力試験用集合体の外形は、炉心燃料集合体と同様であり、全長は、2970mmである。

高線出力試験用集合体は、図2.2に示す炉心中央（炉心第0列（000））に装荷された。

2.3 試験方法

B5D-1試験時のプラントの運転は、図2.3示す出力上昇、降下パターンで実施する。その概要は以下の通りとする。

- (1)通常操作により原子炉を起動し15MWtまで出力上昇させる。
- (2)60MWtまでは、通常出力上昇速度5MWt/30minで上昇させる。
- (3)60MWtで約1時間出力を保持し、中性子検出器の熱出力校正を行う。
- (4)95MWtまで0.4MWt/minで上昇させる。
- (5)95MWtで10min間出力を保持する。（この間に性能検査（局立）を受検する）
- (6)95MWtから65MWtまで出力を連続降下させる。これは、目標出力より30MWt低い出力（65MWt）まで制御棒を連続的に挿入し、1時間保持することによりプラントの運転制限値の系統Na温度平均変化率50℃/h以下を守る。
- (7)通常操作により原子炉の出力降下及び停止を行う。

- * 目標出力は、97MWtであるが、オーバシュートにより原子炉出力が性能検査（局立）の上限値である97MWtを超過するのを防止する為、原子炉出力は、95MWtで保持すると部内技術検討会で決定された。

原子炉起動から停止までの確認、プラント操作主項目を表2.1示す。

2.4 試験時の制限条件

本試験は、「常陽」の出力を通常の運転時よりも速い速度で上げるため、原子炉出口Na温度とオーバフロータンクNa温度との温度差が従来より高くなる。従って、制限値の80℃を守るために温度差低減対策として1次純化系流量を9m³/hから6m³/hに、オーバフロー系汲み上げ流量を12m³/hから14.5m³/hにそれぞれ変更し、制限値の80℃を越える恐れがある場合には出力上昇速度を緩めることとする。また、原子炉入口Na温度が380℃を越える恐れがある場合には出力上昇速度を緩めることとする。

なお、特殊試験実施要領書に基づき以下に示す中性子束高（出力領域）による原子炉ス

スクラム設定値、原子炉出口Na温度高による制御棒一斉挿入の設定値、中性子束高（出力領域）及び原子炉出口Na温度高による警報の設定値を変更する。

(1)中性子束高（出力領域）

- ・スクラム設定値
102.8% [目標出力(9.7MWt)の106%]
- ・警報の設定値
99.9% [目標出力(9.7MWt)の103%]

(2)原子炉出口Na温度高

- ・制御棒一斉挿入の設定値
506.0℃ [目標出力時の出口温度496℃+10℃]
- ・警報の設定値
500.9℃ [目標出力時の出口温度496℃+ 5℃]

本試験に於ける原子炉出力上昇中の運転制限値を表2.2に示す。

また、本試験時に燃料破損が発生した場合には以下に示す対応をとることとした。

(1)原子炉停止の判定及び停止方法

- ①FFD-CG法又は、DN法指示のいずれかが運転制限値を越えた場合は、原子炉出力6.7MWtまで制御棒を連続挿入後通常停止する。
- ②FFD-CG法及びDN法指示の両方が運転制限値を越えた場合は、制御棒一斉挿入により原子炉を停止する。

* 運転制限値

- ・DN法
B・Gの5倍 $\left\{ \begin{array}{l} \text{BF}^3 : 2.9 \times 10^4 \text{ cps} \\ {}^{10}\text{B} : 116 \text{ cps} \end{array} \right.$
- ・CG法
B・Gの10倍 $8.14 \times 10^4 \text{ count (ソークタイム1min)}$

(2)プラント対応

- ①FPガスの大気放出を防止するため、Ar廃ガス系を手動にて貯留モードとする。
- ②カバーガス中のFPガスの純化方法は、炉容器カバーガスのパージにより行う。
- ③Na中のFPの純化は、CSトラップにより行う。
- ④CGCSの運用、フラックスティルティング法による測定、オンラインγ線モニタ

による測定及びFFDLによる測定は、カバーガス中のFPガス濃度及び破損燃料の特定等必要に応じて別途定めるものとする。

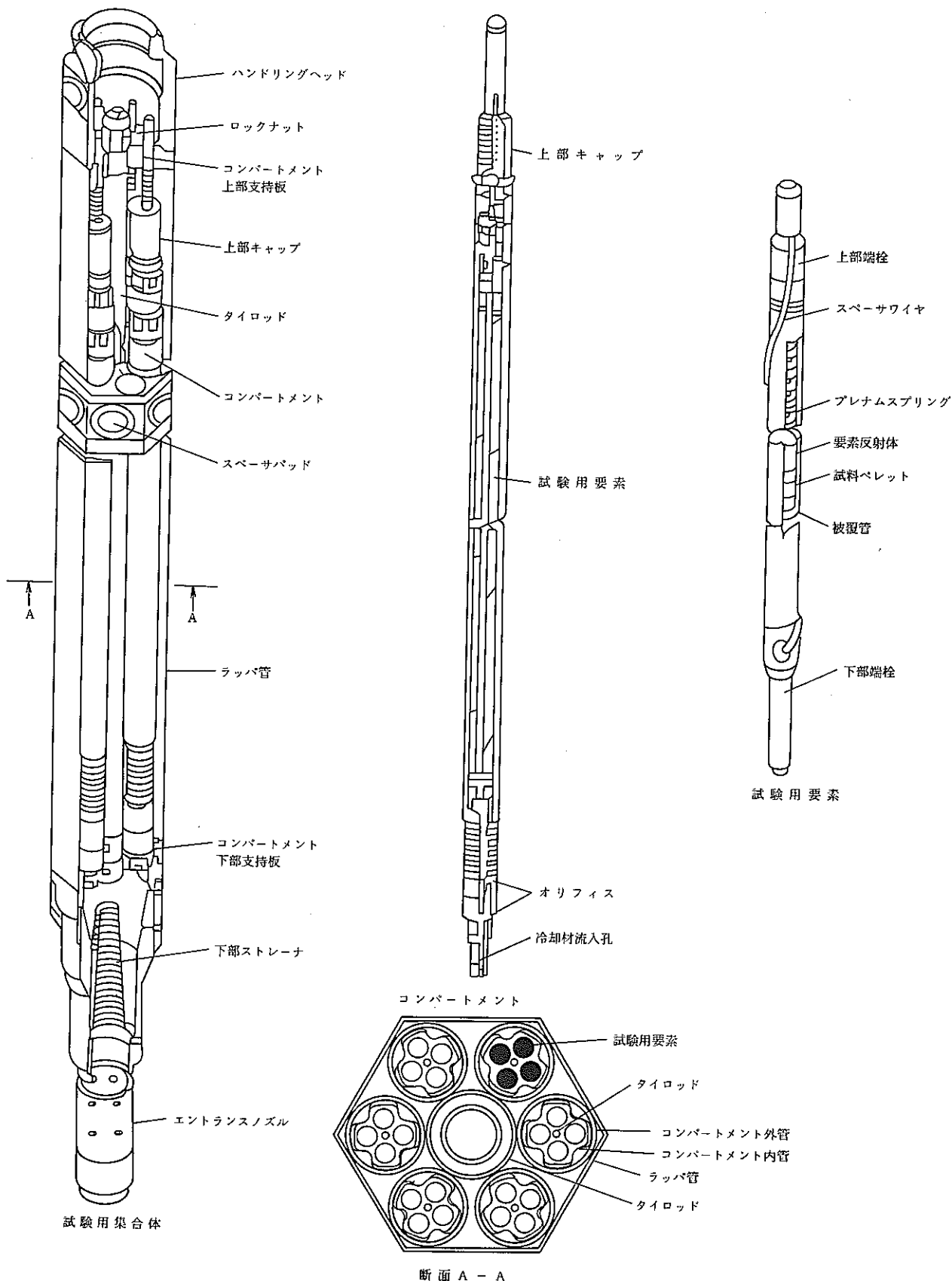
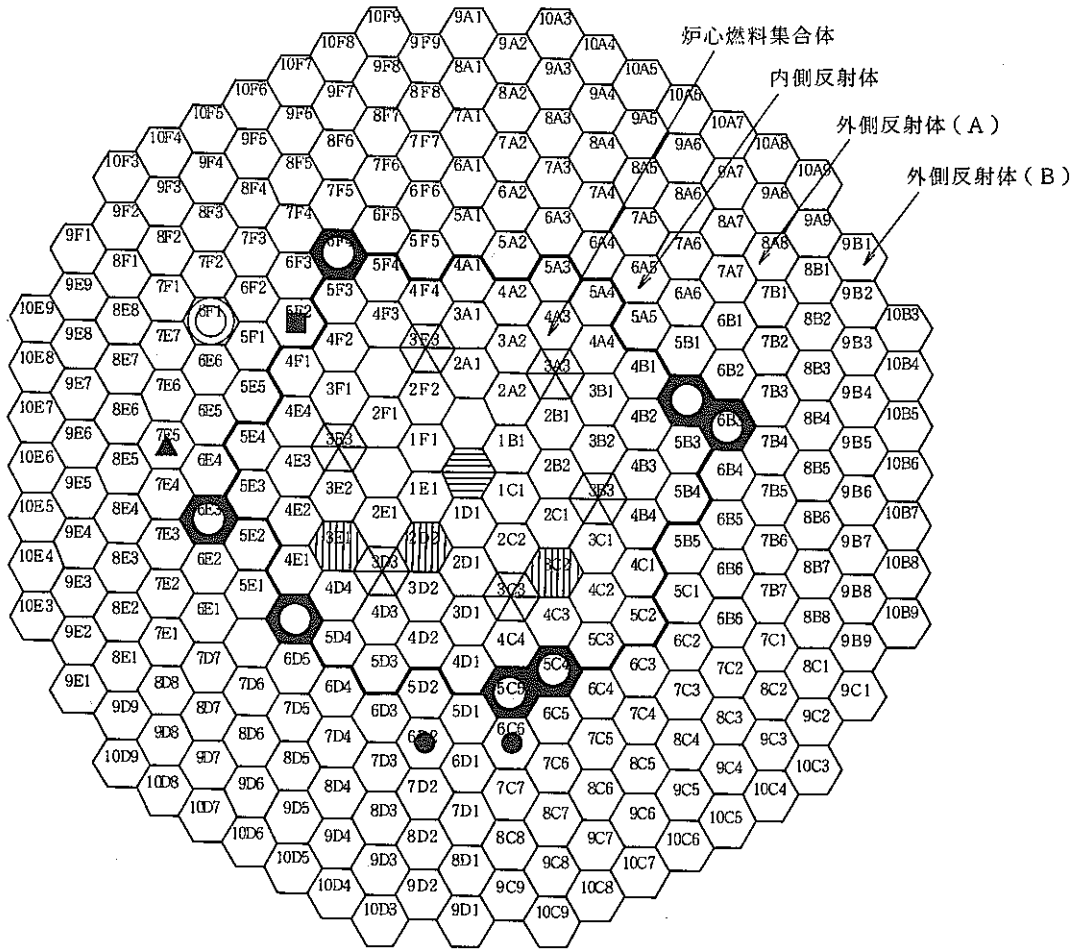


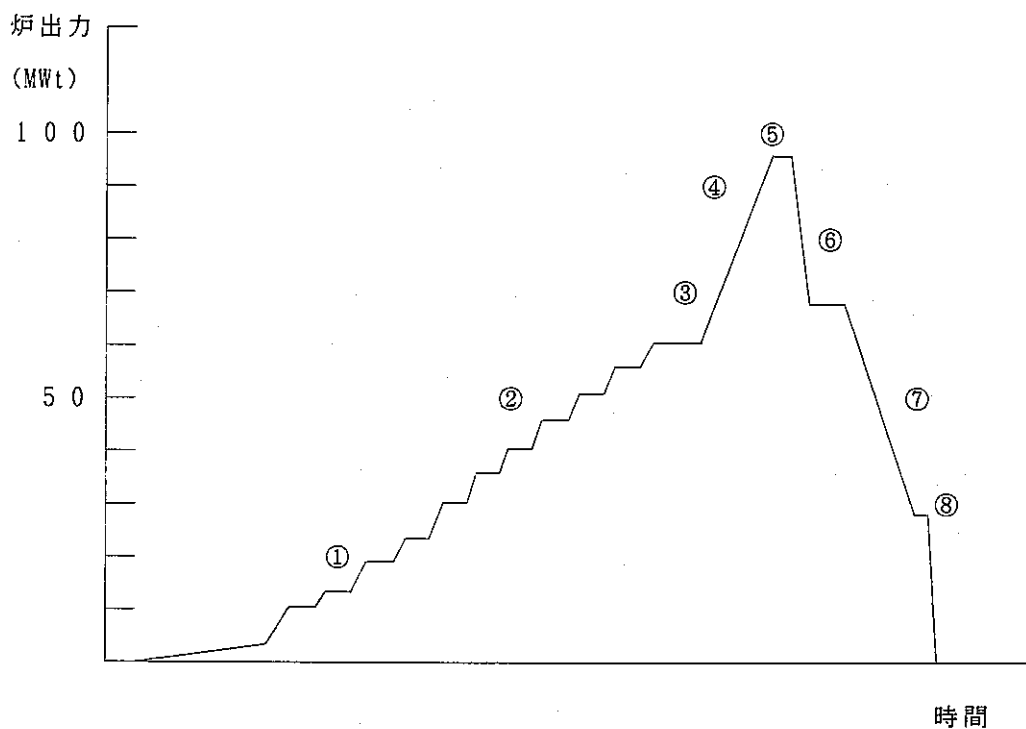
図2.1 高線出力試験用集合体 (B5D-1) 構造図

基準方位 (トランスファロータ)



凡例	要素名	凡例	要素名
	炉心燃料集合体		材料照射用反射体 (構造材料等)
	制御棒		C型特殊燃料集合体
	中性子源		試験用集合体
	材料照射用反射体 (制御棒材料)		
	材料照射用校正試験装置 試料部集合体		
	材料照射用反射体 (遮蔽材料)		

図2.2 試験用炉心配置図



運転手順

- ① 15 MWtまでは通常の出力量上昇パターンとする。
- ② 60 MWtまでは出力を5 MWt / 30 minで上昇させる。
- ③ 60 MWtで約1時間出力を保持する。
- ④ 95 MWtまでは出力を0.4 MWt / minで連続的に上昇させる。
- ⑤ 95 MWtで約10分間出力を保持する。
- ⑥ 67 MWtまでは制御棒を連続的に挿入し出力を降下させ、67 MWtで約1時間保持する。
- ⑦ 67 MWtからは通常の出力量降下速度に戻し、30 MWtまで出力を降下させる。
- ⑧ 30 MWtにて手動制御棒一斉挿入で原子炉を停止する。

本試験範囲は、上記②、③、④、⑤、⑥である。

図2.3 高線出力試験その1出力パターン

表 2. 1 プラント操作主項目

プラント状態	プラントの操作及び確認
原子炉起動前確認	<ul style="list-style-type: none"> ・中性子束高（目標出力）による原子炉スクラムの設定値が目標出力の106%になっていること。 ・原子炉出口冷却材温度高による制御棒一斉挿入の設定値が目標出力時の出口温度より10℃高い値になっていること。
試験前確認	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉出力15 MWt
試験開始 出力上昇（その1）	<ul style="list-style-type: none"> ・上昇速度5 MWt / 30 min
中間出力保持	<ul style="list-style-type: none"> ・保持時間1時間（60 MWt） ・熱出力校正
出力上昇（その2）	<ul style="list-style-type: none"> ・上昇速度0.4 MWt / min ・炉容器出口とオーバフロータンク温度差80℃以下 ・原子炉入口温度380℃以下
9.5 MWt 出力保持	<ul style="list-style-type: none"> ・保持時間10 min ・性能検査（B5D-1局立）
出力降下（その1）	<ul style="list-style-type: none"> ・制御棒連続挿入で出力降下 ・6.7 MWt で1時間保持
試験終了 出力降下（その2）	<ul style="list-style-type: none"> ・降下速度10 MWt / 20 min にて30 MWt まで出力降下
原子炉停止	<ul style="list-style-type: none"> ・30 MWt になったら制御棒一斉挿入にて原子炉停止

表 2. 2 運転制限値

原子炉出力上昇中の運転制限

番号	対象項目	制限値		根拠
		通常運転	B5D-1試験	
1	1次系P/L温度	200℃	200℃	酸化物付着による機能低下および腐食を防止するため酸素濃度約10ppm(P/L温度約200℃に相当)以下。
2	2次系P/L温度	225℃	225℃	酸化物付着による機能低下および腐食を防止するため酸素濃度約10ppm(P/L温度約225℃に相当)以下。
3	遮蔽コンクリート温度	70℃	70℃	コンクリートの強度保護のため。
4	回転プラグ表面温度	60℃	60℃	回転プラグ計装品の保護のため。
5	A・Bループ間R/V入口Na温度差	10℃以内	10℃以内	ループ間負荷バランス
6	システムの温度上昇・下降率	50℃/h	50℃/h	軽水炉等の経験をもとに強度計算を行い決定した。
7	OF/TとR/V出口間Na温度差	80℃	80℃	温度差が直接OF汲上げ配管のR/V入口ノズル部に熱応力を与えるため、熱応力を許容範囲内に抑えられる値とした。
8	2次C/T出口とDHX出口間Na温度差	80℃	80℃	温度差が直接純化系の主系統入口ノズル部に熱応力を与えるため、熱応力を許容範囲内に抑えられる値とした。
9	原子炉入口温度	380℃	380℃	制御棒一斉挿入の385℃に対し余裕をもった値とした。

3. B5D-1 照射試験時の プラント操作及び運転特性

本照射試験のための第23' サイクル運転では、原子炉起動から原子炉出力60 MWt までと原子炉出力60 MWt から原子炉停止までの操作は、通常の原子炉起動、出力上昇、出力降下、原子炉停止であった。原子炉出力60 MWt から95 MWt の範囲では、B5D-1 照射試験体の燃料ピン中心が溶融するよう急速な出力上昇及び出力降下を実施した。以下に本試験時のプラント操作の詳細及び運転特性について記述する。

3. 1 試験時のプラント操作

(1) 試験準備

第23' サイクル運転は、通常の原子炉起動前確認、原子炉安全保護系（原子炉スクラム、制御棒一斉挿入）のインターロック並びに前警報の設定値が本試験用に設定されていることの確認及びFFD-CG法のソークタイムが1 min であることの確認を実施した後、6月16日16時31分、原子炉を起動した。試験時のプラント状態表を図3.1に示す。

臨界点確認後、差換え法による制御棒値確認試験を実施した後、原子炉出口Na温度とオーバフロータンクNa温度との差を緩和するため、オーバフロー系汲上げ流量を $12 \text{ m}^3 / \text{h}$ から $14.5 \text{ m}^3 / \text{h}$ に、1次純化系流量を $9 \text{ m}^3 / \text{h}$ から $6 \text{ m}^3 / \text{h}$ に設定変更した。

(2) 出力上昇、保持、降下

通常の原子炉起動時同様に核加熱、S/A出口温度計校正等を実施し、通常の出力上昇速度にて原子炉出力15 MWt に到達させた。

原子炉出力15 MWt から60 MWt までの出力上昇操作は5 MWステップで行い、 $5 \text{ MW} / 20 \text{ min}$ （系統 温度上昇率 $20^\circ \text{C} / \text{h}$ 以下）となるよう制御棒を操作し、出力上昇後は、10 min 間出力を保持した。原子炉出力が60 MWt に到達した後1時間これを保持し、その間に熱一核出力校正を実施した。

6月17日13時25分、原子炉出力95 MWt に向けて、急速な原子炉出力上昇操作を開始した。

出力上昇率が所定の $0.4 \text{ MW} / \text{min}$ となるよう制御棒引き抜き速度は、 $3 \text{ mm} / 5 \text{ min}$ にて出力上昇操作を開始したが、出力上昇率が目標値より高めの $0.5 \text{ MW} / \text{min}$ になったため、原子炉出力が80 MWt を越える辺りから制御棒引き抜き速度を $2 \text{ mm} / 5 \text{ min}$ にし

た。また、原子炉出力が90 MWt に到達する頃からは、1 mm/2 min にて制御棒を引き抜き14時38分に、原子炉出力が95 MWt に到達したことが宣言された。（この時の核出力計CH-8の出力は、94.5%であった。）

原子炉出力を95 MWt に10 min 間保持するため、制御棒を2回、各々0.3 mmと0.2 mm挿入して原子炉出力のオーバシュートを抑えた。

原子炉出力95 MWt 到達宣言10 min 後の14時48分には、制御棒の連続挿入により約30 MW (95→67 MWt) の出力降下を行った。原子炉出力を67 MWt で1時間保持した後、30 MWt まで通常の出降下速度で原子炉出力を下げ、17時10分に制御棒の一斉挿入により原子炉を停止した。その後、通常の系統降温操作等を行って第23' サイクル運転を終了した。

原子炉出力の急速な上昇及び降下時の運転操作記録を表3.1に示す。

3.2 原子炉出力上昇・降下時の運転特性

(1)原子炉出力上昇及び降下速度

試験時（急速な出力上昇操作時）の原子炉の出力上昇率0.4 MWt /min を目標とした制御棒の引き抜き量は、3 mm/5 min で8回、2 mm/5 min で4回、1 mm/2 min で5回行い、最終段階には2 min 間隔で各々0.5 mm、0.1 mmを引抜いて、原子炉出力95 MWt に到達した。

試験時の原子炉出力上昇・降下のグラフを図3.2に示す。

原子炉出力80 MWt までの制御棒の引抜き速度は、3 mm/5 min であり、この時の原子炉出力上昇率は0.5 MWt /min となったために、以降、制御棒の引抜き速度を緩めた結果、出力上昇率は、0.4 MWt /min となり、急速な出力上昇操作時の平均出力上昇率は、0.45 MWt /min となった。

95 MWt で10分間保持後の急速な出力降下は、原子炉出力67 MWt に相当する制御棒位置（平均 535 mm）まで各制御棒を5 mmずつ連続挿入して行った。途中、原子炉出力の降下が鈍く、制御棒を全数533 mm（原子炉出力60 MWt に相当）まで挿入し、15時00分に原子炉出力は、67 MWt に到達した。

この制御棒位置を1時間保持し、その後30 MWt まで通常の出降下率-10 MWt /20 min にて出力降下した。

(2)原子炉出口Na温度の上昇率及び降下率

試験時（急速な出力上昇操作時）の原子炉出口Na温度の平均上昇率は、Aループで37.0℃/h、Bループで36.2℃/hとなり制限値の50℃/hを下回った。

オーバフロータンクNa温度の平均上昇率は16.4℃/hとなった。試験時の原子炉

出口Na温度及びオーバフロータンクNa温度の変化を図3. 3に示す。

また、原子炉出口Na温度とオーバフロータンクNa温度との差は、最大Aループ側で70℃となり、制限値80℃をクリアした。

出力降下時の原子炉出口Na温度平均降下率は、Aループで40.8℃/h、Bループで39.2℃/hとなり制限値の50℃/hを下回った。

3. 3 試験時のプラント状態

本試験時のプラントは、原子炉起動から急速な出力上昇及び降下時を含めて安定しており、試験期間中のトラブルもなく、また、試験を阻害する事象も皆無であった。

なお、今回の試験で判明したプラント事象がいくつかあるので、今後の参考のため以下に示す。

(1)2次温度制御系のCASモードでの追従性は、最大0.5MWt/minの速い出力上昇に対しては良好に追従し、原子炉入口温度を370℃一定保持した。また、約30MWtの急速な出力降下に対しては若干の制御遅れが見られ、一時的に原子炉入口温度が数℃低下したが運転上支障はなかった。今後これより大巾な出力降下が要求される場合は、アンダーシュートによる反応度フィードバックを考慮する必要がある。

(2)主送風機起動時(炉出力12MWt)の電圧降下により、オーバーフロー系の流量が低下し制御動作によってIVR上限リミットスイッチが動作した。このため、オーバーフロー系の流量制御を「自動」から「手動」に切替えて運転した。「手動」運転においてもほぼ一定の流量が確保され試験への影響は無かったが、今後これを避けるには、オーバーフロー系の流量変更時期を主送風機起動後に行うか、あるいは、主送風機起動時は流量制御を一時的に「手動」に切替えることで解決できる。

(3)当初、速い出力上昇に伴い安全容器の排気回数が急増することが予想されたが、出力上昇期間中の排気は1回のみであった。これは、出力上昇時間が短かったため、安全容器内のグラファイト遮蔽体の温度上昇があまり無かったものと考えられる。

3. 4 試験時の運転制限値

本試験中の運転制限値は、いずれも表2. 2に示す値を十分満足しており、特に問題となるプラント上の警報等も無く無事に試験を終了することができた。

表3.1 プラント状態表(1)3年6月16日(日) (1/2)

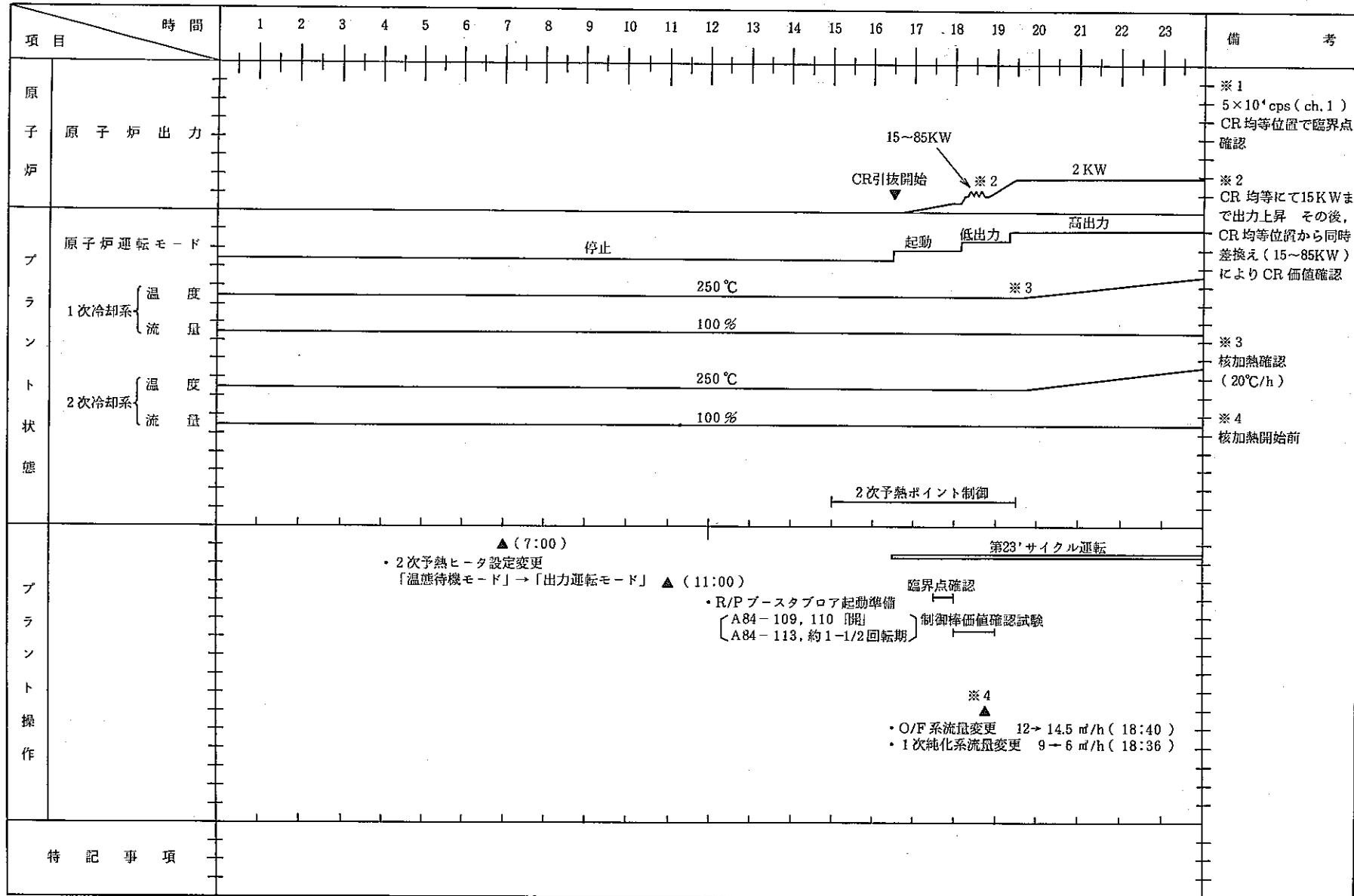


表3.1 プラント状態表(2)3年6月17日(月)(2/2)

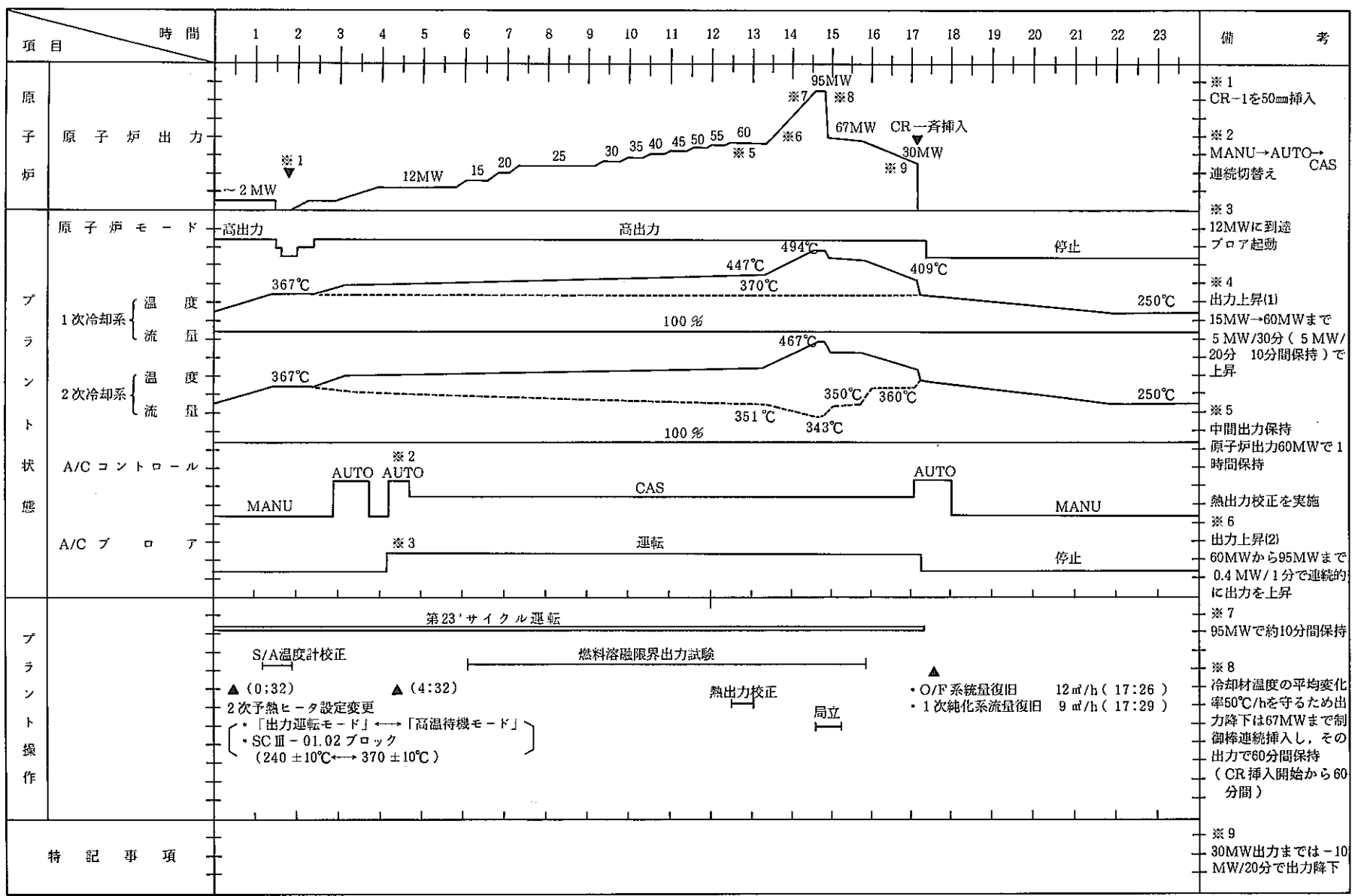


表3.2 B5D-1照射試験運転操作記録

1991.6.17

時刻	制御棒位置						引抜量 mm 目標 実績	熱出力 (MWt)	核出力 (%)			RV出口Na温度 (°C)		OF/T Na温度 (°C)	
	CR-1	CR-2	CR-3	CR-4	CR-5	CR-6			CH-6	CH-7	CH-8	Aルーフ	Bルーフ		
13:00	534.0	534.0	533.0	533.0	533.0			61.0	61.0	60.5	61.0	450	442	402	
13:21	534.0	534.0	533.0	533.0	533.0			61.0	61.0	60.5	61.0	450	442	406	
13:25			536.0				3.0 3.0								
13:30				536.0			3.0 3.0	62.5	62.5	62.5	63.0	452	444	407	
13:35					536.0		3.0 3.0	65.0	64.5	64.5	65.0	455	447	407	
13:40						536.0	3.0 3.0	67.5	67.0	67.0	67.5	458	450	408	
13:45	537.0						3.0 3.0	69.5	69.5	69.0	70.0	460	452	410	
13:50		537.0					3.0 3.0	72.5	72.0	72.0	72.5	463	457	410	
13:55			539.0				3.0 3.0	75.5	75.0	75.0	75.5	468	462	411	
14:00				539.0			3.0 3.0	79.0	78.5	78.5	79.0	472	464	412	
14:05					538.0		2.0 2.0	81.0	80.5	80.5	81.0	475	468	413	
14:10						538.0	2.0 2.0	83.0	83.0	83.0	83.5	478	471	414	
14:15	538.9						2.0 1.3	86.0	85.0	85.0	85.0	481	473	416	
14:20					540.0		2.0 2.0	88.0	86.5	86.5	87.0	483	476	418	
14:25		538.2					1.0 1.2	90.0	88.5	89.0	89.0	487	479	420	
14:27			540.0				1.0 1.0	90.5	90.0	90.0	90.0	488	480	422	
14:29				540.0			1.0 1.0	92.0	91.0	91.0	91.0	489	481	422	
14:31						539.0	1.0 1.0	92.5	91.5	92.0	92.0	491	483	423	
14:33	540.0						1.0 1.1	93.0	92.0	92.5	92.5	492	483	423	
14:35					540.5		0.5 0.6	94.5	93.0	93.0	93.0	493	484	424	
14:37					540.6		0.2 0.1	95.0	93.5	94.0	94.0	494	485	424	
14:38	540.0	538.2	540.0	540.0	540.6	538.0		96.0	94.0	94.5	94.5	495	486	426	
	(9.5 MW到達)														
14:44					540.3		-0.2 -0.3								
14:45					540.1		-0.2 -0.2	96.5	94.5	94.5	94.5	497	487	429	
14:48	540.0	538.2	540.0	540.0	540.1	539.0		96.5	94.5	94.5	94.5	497	487	429	
	(出力降下前)														
14:48	533.0	533.0	533.0	533.0	533.0	533.0									
	(出力降下後)														
16:00	533.0	533.0	533.0	533.0	533.0	533.0		60.0	59.5	59.5	60.0	448	440	426	

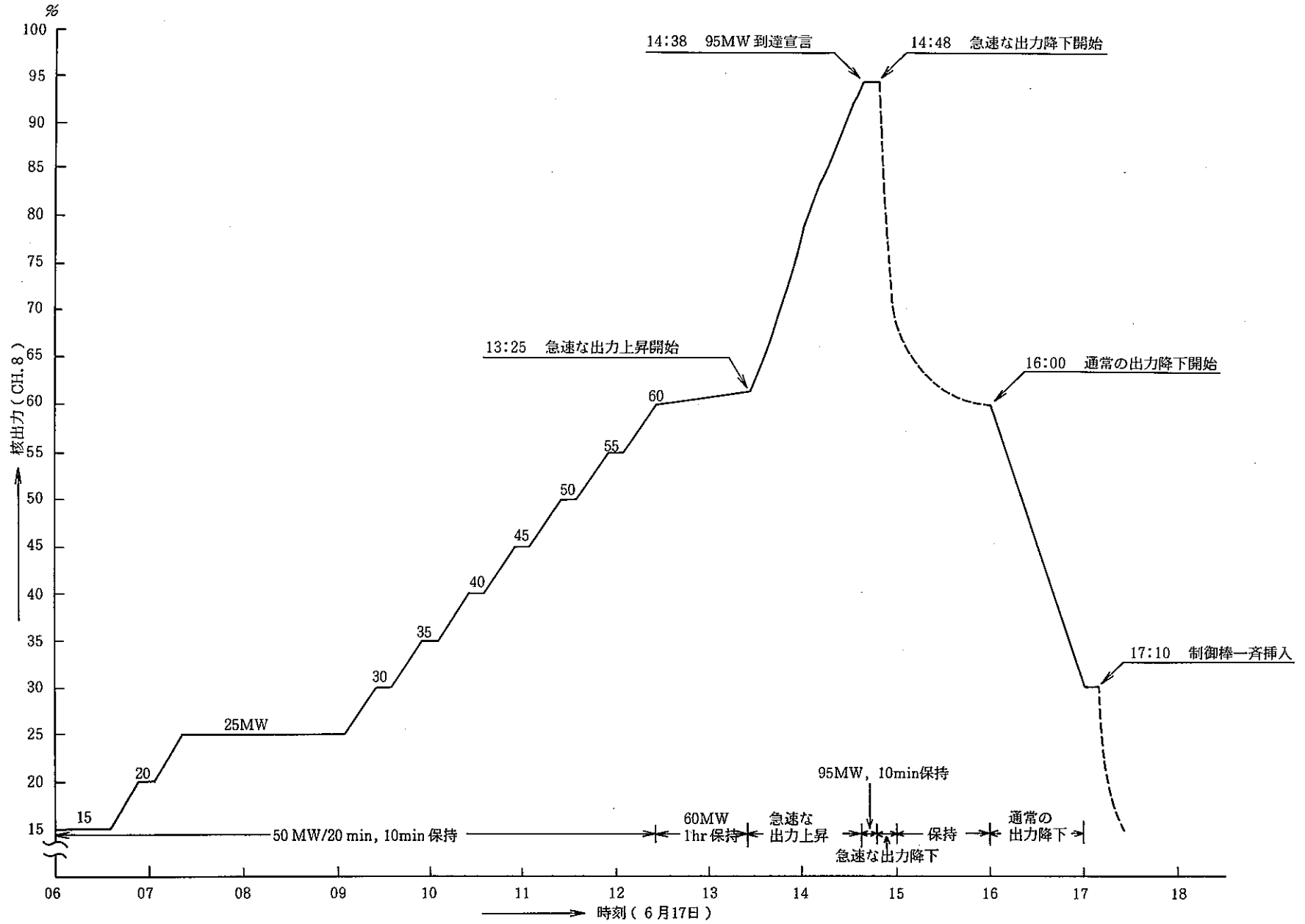


図3.1 B5D-1 照射試験核出力記録

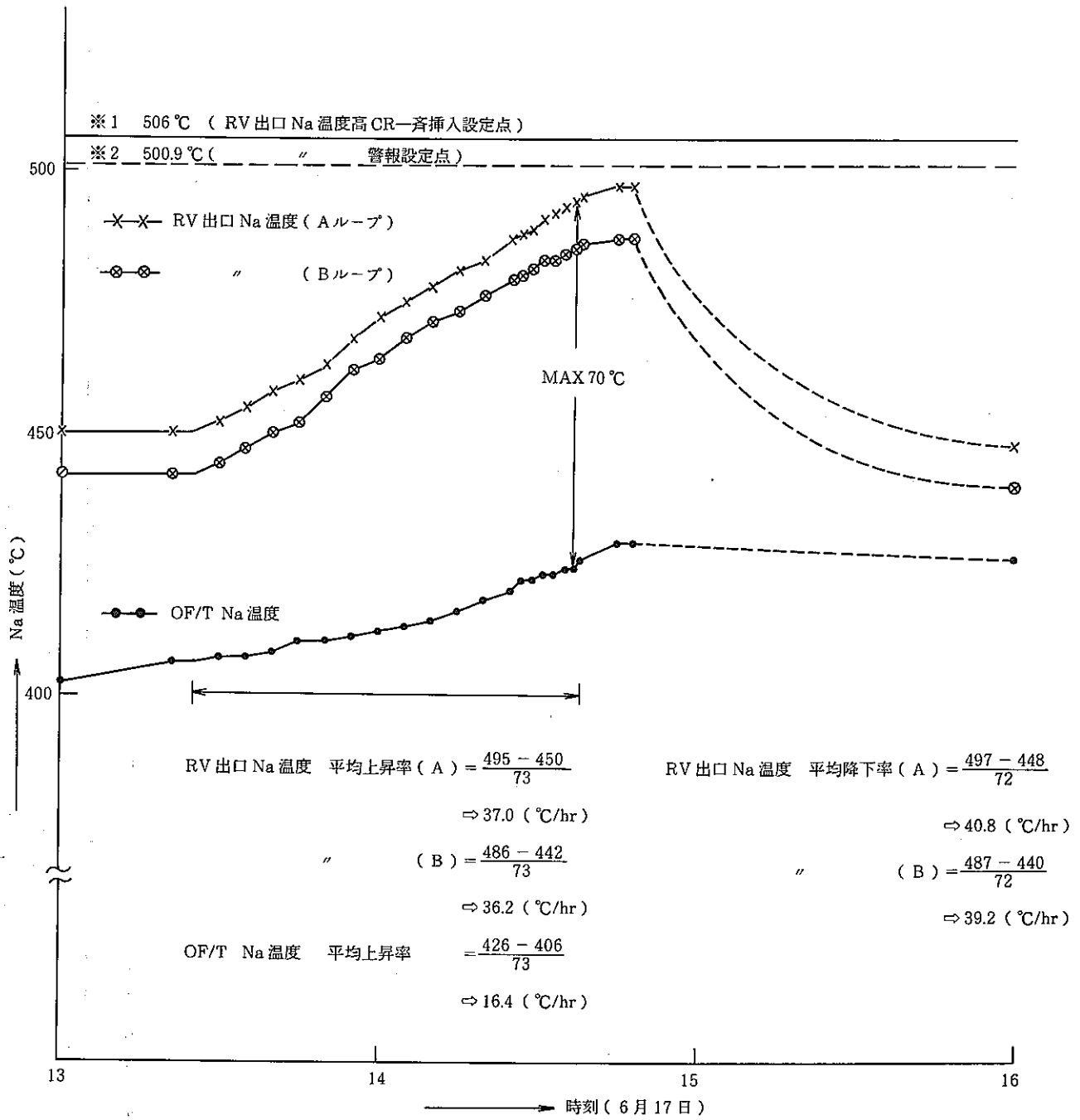


図3.2 B5D-1照射試験各部Na温度記録

4. プラント運転制限値の検討

今回の試験結果及びシュミレータを使つてのシュミレーション結果により、原子炉出口Na温度上昇率の上限値並びに原子炉出口Na温度とオーバフロータンクNa温度との差が制限値を越えない最大の出力上昇率を検討した。

シュミレータを使用して、2mm/5minの制御棒引抜き速度にて出力上昇を行った結果を表4.1にその時の各温度変化を図4.1に示す。なお、オーバフロー電磁ポンプ及び1次純化系電磁ポンプの汲み上げ流量は、実試験と同程度のそれぞれ14m³/h、6m³/hとした。

シュミレーションの結果、原子炉出力の上昇率は、0.61MWt/minとなった。また、原子炉出口Na温度の平均上昇率は、48.4°C/hとなり、そして原子炉出口Na温度とオーバフロータンクNa温度との差は最大56°Cとなった。この時のオーバフロータンクNa温度の平均上昇率は、11.6°C/hであった。

しかしながら、実試験時の急速な出力上昇操作前の原子炉出口Na温度とオーバフロータンクNa温度との差は44°Cであるのに対し、シュミレータでは21°CでありオーバフロータンクNa温度の上昇率は実試験時の16.4°C/hに比べ低いにもかかわらず最大温度差は小さくなった。

そこで、急速な出力上昇操作前の温度差を44°Cとし、オーバフロータンクNa温度の上昇率11.6°C/hを使用して95MWt到達時のオーバフロータンクNa温度を推測すると

$$(44.9^{\circ}\text{C} - 44^{\circ}\text{C}) + 11.6^{\circ}\text{C} \times 57\text{min}/60\text{min} = 41.6^{\circ}\text{C} \quad \text{となり}$$

原子炉出口Na温度とオーバフロータンクNa温度との差は最大79°Cとなり、僅差であるが制限値80°Cを満足することになる。

以上のことから、今後の高線出力試験では、炉心状態によることは勿論であるが、原子炉出口Na温度の上昇率及び原子炉出口Na温度とオーバフロータンクNa温度との差の制限値80°Cを越えない最大の出力上昇率は、0.60MWt/minで、その時の制御棒引抜き速度は、6mm/5min程度であると予測される。

表4.1 シミュレーション記録(1)

CR引抜き速度：6mm/5min

オーバーフローEMP：14 m³/h
 純化系 EMP：6 m³/h

項目 時刻	制御棒位置						引抜き量 mm 目標 実績	熱出力 (MWt)	核出力 (%)			RV出口Na温度 (°C)		OF/T Na温度 (°C)
	CR-1	CR-2	CR-3	CR-4	CR-5	CR-6			CH-6	CH-7	CH-8	A炉-1	B炉-1	
(出力上昇前)	478	477.5	477.4	477.5	477.5	477.5		60.5	60	60	59.5	449	448	428
0 ()	484.3						6.0 6.3							
5 ()		483.5					6.0 6.0	64	63.5	62.5	62.5	451	451	428
10 ()			483.6				6.0 6.2	66.5	66.0	65.5	65.5	457	457	428
15 ()				483.3			6.0 6.3	70.0	69.5	68.5	68.5	460	460	430
20 ()					483.4		6.0 6.3	72.5	72.5	72.0	72.0	464	464	430
25 ()						483.5	6.0 6.0	76.0	75.5	75.5	75.0	468	467	430
30 ()	490.0						6.0 6.7	79.0	78.5	78.0	78.0	472	472	431
35 ()		489.6					6.0 6.1	82.0	82.0	81.5	81.5	477	477	432
40 ()			489.6				6.0 6.0	85.5	84.5	84.5	84.0	481	481	432
45 ()				489.5			6.0 6.2	88.5	88.0	87.5	87.5	485	484	434
50 ()					489.6		6.0 6.2	92.0	91.5	91.5	91.0	490	489	435
55 ()						484.6	1.0 1.1	95.5	95.0	94.5	94.0	493	492	437
57 ()								96.0	95.5	95.0	94.5	495	494	439
									* CH-6 以外は記録計の指示値					

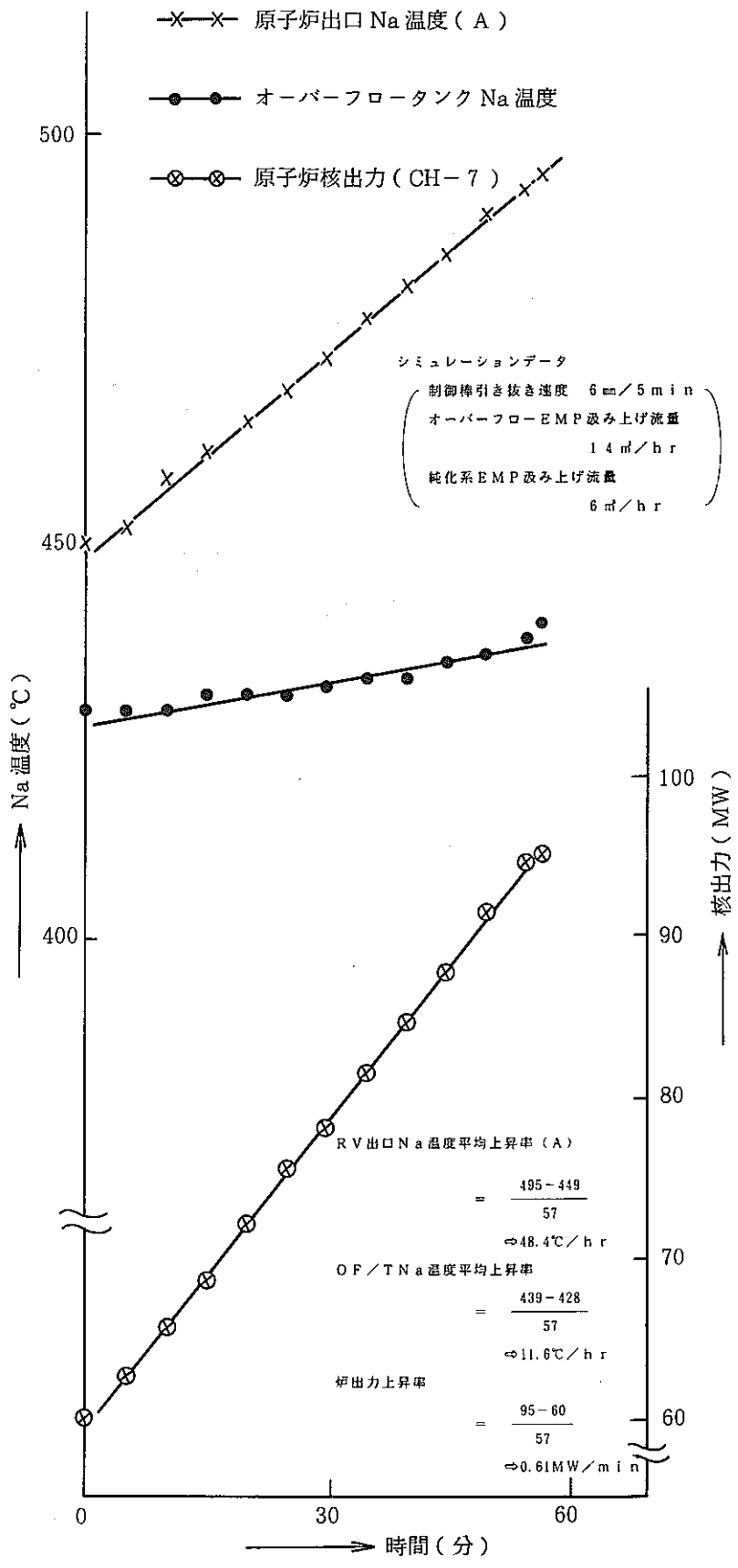


図4.1 シミュレーション記録(2)

5. 結 言

今回の高線出力試験（B5D-1照射試験）のプラント運転に当たっては、これまでの運転経験のレビュー、出力パターンを模擬した予備試験の実施、シミュレータを用いたプラント挙動の把握及び運転操作訓練等の準備がなされた。プラント操作はこれらの結果を基に慎重に実施され、特に問題となるようなトラブルも無く無事に試験を終了することができ、高線出力試験に係わる運転操作技術をマスターすることが出来た。また、試験実施体制面においては、試験実施担当の照射課が全体とりまとめに当たり、原子炉第一課がプラント運転操作を担当したほか、技術課及び原子炉第二課が制御棒操作量の予測、出力監視及び原子炉保護系設定値管理面でこれを支援した。

以上のように本試験は、実験炉各課の協力・連携と万全の準備の基に実施され、初期の目的を達成したものである。この経験は、今後数回に渡り実施される予定の高線出力試験を安全かつ確実に実施できることを確証するものである。

なお、照射後のPIEにおいて、ほとんどの試験燃料ピンに予測通りの中心溶融が確認されB5D-1照射試験は成功した。

6. 参考文献

- (1) 磯崎和則 他 : 高速実験炉「常陽」運転報告書 PNC I 9430 87-001
B 4 M照射試験時の運転経験 1987年1月
- (2) 高速実験炉設工認申請書
〔試験用集合体（高線出力試験用集合体）の製作（その1）〕
- (3) 高速実験炉設工認申請書
〔試験用集合体（高線出力試験用集合体）の製作（その2）〕

7. 付 録

B 5 D - 1 照射試験に際しての予備試験

7. B5D-1 試験に際しての予備試験

1. 予備試験の概要

第23サイクル定格運転時の5月23日に炉出力（核出力 Ch-8）を90MWtまで降下させ、プラント状態安定後97MWtを目標に0.4MWt/minの一定速度で炉出力を上昇させ、97MWt到達後10min間保持し、再び90MWtまで制御棒を連続挿入することにより炉出力を降下させる。

なお、90MWtから97MWtまでの炉出力上昇操作の際には制御棒CR-6（1本）の引き抜きにより行う。

2. 予備試験の目的

第23'サイクル運転時の6月16日、17日の両日に実施が予定されている高線出力試験その1の出力上昇、保持、出力降下パターンの模擬試験を行いプラントの操作性及び追従性、安定性及び目標到達出力の計画精度を事前確認する。

3. 試験内容

原子炉出力上昇率0.4MWt/minになるように一定の時間間隔で制御棒を一定量引き抜き、JOYDAS及び熱出力測定システムで核出力（Ch-6, 7, 8）と熱出力の時間変化を測定・記録する。

4. 予備試験の結果

予備試験は、図7.1に示す原子炉出力パターンを基に第23サイクル定格運転時の5月23日に実施された。

(1)プラント操作実績

予備試験は、2次温度制御系を「AUTO」から「CAS」に切り替えた後、制御棒均等挿入にて出力を90MWtまで降下させ、プラントの安定を確認後10時20分より制御棒引き抜きにより出力上昇を開始した。

0.4MWt/minの出力上昇率に相当する制御棒引き抜き量は2.0mm/2.5minであり、

これを制御棒（CR-6）で9回引抜き、10回目に1.5mm引き抜いた。

10時44分に目標の97MWt（核出力 Ch-8）に到達した。

目標出力到達後、出力のオーバーシュートが有り、1回制御棒（CR-6）を0.6mm挿入し97MWtを保持した。

その後、97MWt到達から10分後の10時54分に制御棒（CR-6）を90MW出力時の制御棒位置まで連続挿入して出力降下させた。

11時00分には、出力を90MWtまで降下させプラントの安定を確認後、通常出力上昇率でプラントを100MWtに復旧させた。また、2次温度制御系を「CAS」から「AUTO」に切替え本試験に関する操作を終了した。

表7.1に予備試験時の制御棒操作記録を示す。

(2)出力上昇時の昇温率

出力上昇時の昇温率は、それぞれ

- ・Aループ

$$(495^{\circ}\text{C} - 482^{\circ}\text{C}) / 24\text{min} = 32.5^{\circ}\text{C}/\text{h}$$

- ・Bループ

$$(487^{\circ}\text{C} - 476^{\circ}\text{C}) / 24\text{min} = 27.5^{\circ}\text{C}/\text{h}$$

であり、平均値は $30.0^{\circ}\text{C}/\text{h}$ であった。

(3)目標出力達成後のオーバーシュート

目標出力97MWtを予測し、最後の制御棒引抜きを1.5mmとしたが、目標出力到達後の約9min後に核出力（ch-8）で0.5%、熱出力で1.0MWtのオーバーシュートがあり、制御棒挿入により出力調整を実施した。

これにより、高線出力試験での目標出力到達後にも出力調整を実施する必要があることが判った。

(4)出力上昇時の原子炉出口Na温度とオーバフロータンクNa温度との差

今回の予備試験では、温度差低減対策を実施しなかったが原子炉出口Na温度とオーバフロータンクNa温度との差は、最大56°Cであり特に問題はなかった。

図7.2に原子炉出口Na温度とオーバフロータンクNa温度との差を示す。

(5)出力降下時の降温率

出力降下時の降温率は、それぞれ

・ A ループ

$$(495^{\circ}\text{C} - 485^{\circ}\text{C}) / 6 \text{ min} = 100.0^{\circ}\text{C}/\text{h}$$

・ B ループ

$$(487^{\circ}\text{C} - 478^{\circ}\text{C}) / 6 \text{ min} = 90.0^{\circ}\text{C}/\text{h}$$

であるが、これに保持時間 25 min を考慮すると

・ A ループ

$$(495^{\circ}\text{C} - 485^{\circ}\text{C}) / 31 \text{ min} = 19.4^{\circ}\text{C}/\text{h}$$

・ B ループ

$$(487^{\circ}\text{C} - 478^{\circ}\text{C}) / 31 \text{ min} = 17.4^{\circ}\text{C}/\text{h}$$

となり、平均値は $18.4^{\circ}\text{C}/\text{h}$ であった。

このことから、制御棒の連続挿入時の降温率は、一時的には大きくなるが出力降下後のプラントの安定を保つための保持時間 25 min を考慮すると降温率は、保安規定上の制限値 $50^{\circ}\text{C}/\text{h}$ を充分下回ることが判った。

5. 結 言

今回の予備試験では、炉出力上昇時の昇温率 $30^{\circ}\text{C}/\text{h}$ (A, B ループ平均), 出力降下時の降温率 $18.4^{\circ}\text{C}/\text{h}$ (A, B ループ平均) でいずれも保安規定の制限値 $50^{\circ}\text{C}/\text{h}$ より充分小さいことが確認された。

また、目標出力到達後のオーバーシュートは、核出力 (c h - 8) で 0.5%, 熱出力で 1.0 MWt であり、制御棒挿入による出力調整でカバーできることが確認された。

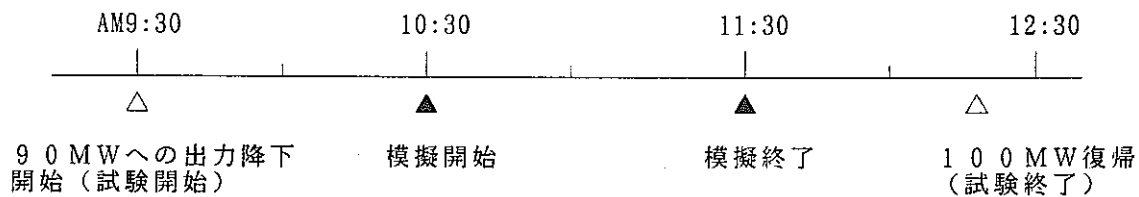
さらに、出力上昇時の原子炉出口 Na 温度とオーバフロータンク Na 温度との差については、温度差低減対策 (オーバフロータンク電磁ポンプ汲み上げ流量変更 $12 \text{ m}^3/\text{h} \rightarrow 14.5 \text{ m}^3/\text{h}$, 純化系電磁ポンプ汲み上げ流量変更 $9 \text{ m}^3/\text{h} \rightarrow 6 \text{ m}^3/\text{h}$) を実施しなかったが温度差の最大値は、 56°C で保安規定の制限値 80°C より充分小さいことが判った。

以上のことから本試験時に所要の炉出力パターンを得るために予備試験と同様の制御棒操作パターンをとれば上手くいくことが判った。また、プラントの制限値も充分にクリアできる見通しが得られた。

(1) 試験工程

- 1) 試験実施年月日：平成3年5月23日（木曜日）
- 2) 実施工程と原子炉出力パターン

[実施工程]



[出力パターン]

原子炉出力 (MWT)

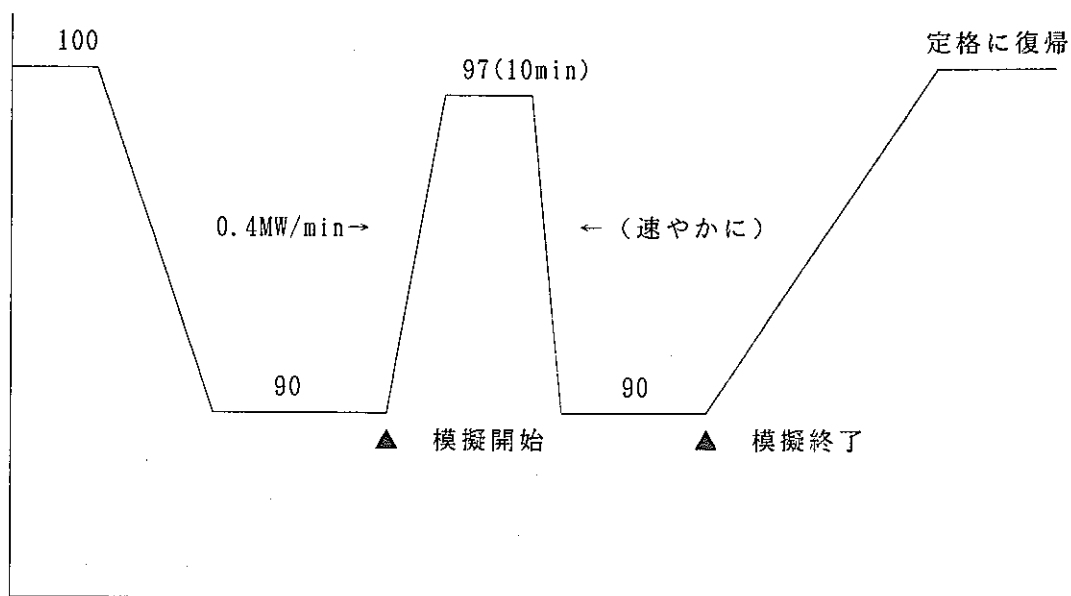


図7.1 予備試験時の原子炉出力パターン

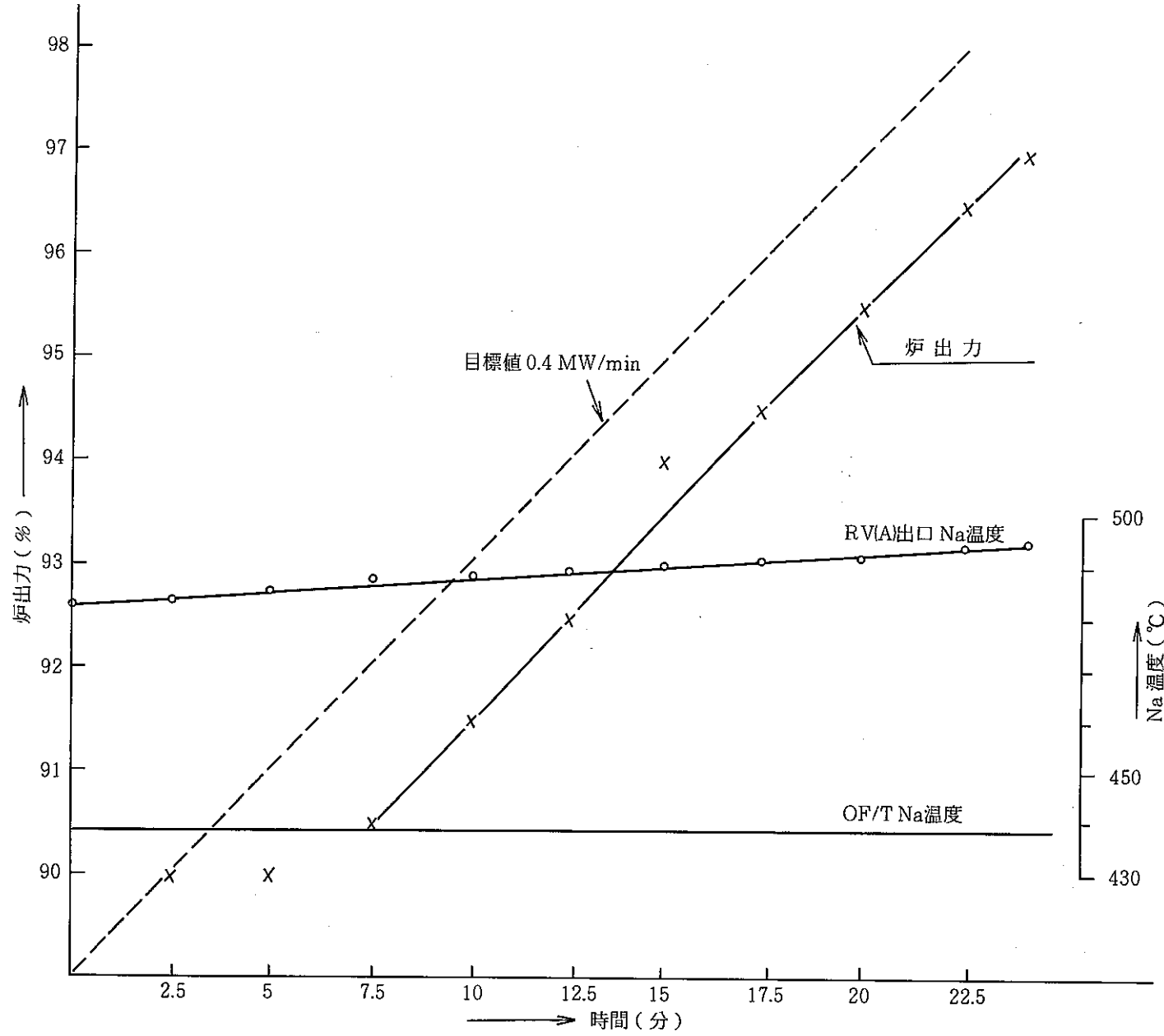


図7.2 原子炉出口Na温度とオーバーフロータンクNa温度変化

表7.1 制御棒操作記録

項目 時刻	制御棒位置						引抜き量 mm 目標 実績	熱出力 (MWt)	核出力 (%)			RV出口Na温度 (°C)		OF/T Na温度 (°C)			
	CR-1	CR-2	CR-3	CR-4	CR-5	CR-6			CH-6	CH-7	CH-8	Aループ	Bループ				
9:39 (試験前)	605.0	605.0	605.0	604.4	605.0	605.0		96.5	97.0	97.5	98.0	493	487	441			
10.00 ()	602.8	603.0	603.0	602.3	603.1	601.5	13.7	89.0	89.5	90.0	90.0	483	477	441			
()																	
10:20 (00)	602.8	603.0	603.0	602.3	603.1	603.5	2.0 2.0	87.0	87.5	88.0	89.0	482	476	441			
(2.5)						605.4	2.0 1.3	CR操作の2分後			87.5	89.0	89.5	90.0	483	476	439
(5.0)						607.4	2.0 2.0	88.0	89.5	89.5	90.0	485	477	439			
(7.5)						609.4	2.0 2.0	89.0	90.0	90.0	90.5	487	479	439			
(10.0)						611.4	2.0 2.0	89.5	90.5	91.0	91.5	488	480	439			
(17.5)						613.4	2.0 2.0	90.5	91.5	92.0	92.5	489	481	439			
(15.0)						615.4	2.0 2.0	91.5	92.5	93.0	94.0	490	483	439			
(17.5)						617.3	2.0 1.3	92.5	93.5	94.0	94.5	491	484	439			
(20.0)						619.3	2.0 2.0	93.0	94.5	95.0	95.5	492	485	439			
(22.5)						620.8	1.5 1.5	94.0	95.5	96.0	96.5	494	486	439			
10:44 (97MW到達)								96.0	96.0	96.5	97.0	495	487	439			
10:53 ()						620.2	-0.8	97.0	97.5	97.5	97.5	495	487	439			
10:54 ()	CR-6連続挿入					601.5	-13.7										
11:00 ()	90MW到達							90.0	90.0	90.5	91.0	485	478	439			
11:25 ()	100MWへの出力調整開始																