

JAERI-M
83-210

ROSA—III 100%主蒸気管破断実験の
RELAP5/MOD1コードによる解析
(HPCS注入実験・RUN952の解析)

1983年11月

村田 裕幸*・鈴木 光弘・田坂 完二

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村 日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1983

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日立高速印刷株式会社

ROSA-Ⅲ 100%主蒸気管破断実験のRELAP5/MOD1コード
による解析 (HPCS注入実験・RUN 952の解析)

日本原子力研究所東海研究所安全工学部
村田 裕幸*・鈴木 光弘・田坂 完二

(1983年11月9日受理)

BWRの想定事故の1つ主蒸気管破断事故については、従来、系内の残存水量が多いため炉心の露出には至らないとされていたが、ROSA-Ⅲの模擬実験の結果によると炉心は水位低下により露出すること、ある種の条件下では炉心冷却が悪化する場合があることがわかった。本報はこうした現象を解明することを目的とした解析の中で、高圧炉心スプレイ系(HPCS)を作動させた100%主蒸気管破断実験RUN 952をRELAP5/MOD1コードにより解析した結果をまとめたものである。

この解析により、減圧沸とう過程におけるダウンカマー水位のスエリングや炉心水位低下による燃料棒のドライアウト等の特徴的現象を解析的に裏づけることができた。また、蒸気流出に関する計算モデルと気水分離器モデルの評価を行ない、主蒸気管破断事故に対するコードの性能を調べた。

* 原子炉研修生、運輸省船舶技術研究所

An Analysis of 100 % Steam Line Break Test
in the ROSA-III Program by Using RELAP5/MOD1 Code
(Analysis of RUN952, an HPCS Injection Test)

Hiroyuki MURATA*, Mitsuhiro SUZUKI
and Kanji TAsAKA
Department of Nuclear Safety Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received November 9, 1983)

It had been considered that the core would not be exposed into steam environment in a main steam line break loss-of-coolant accident (LOCA) of the BWR system. However, the ROSA-III test showed that the core could be exposed by the mixture level fall and that the core cooling could be deteriorated. The present report has an aim to clarify analytically these phenomena and gives the analytical results for RUN952, a 100% main steam line break test with an HPCS injection by using the RELAP5/MOD1 code.

It was confirmed by the analytical study that the characteristic phenomena in a steam line break LOCA such as downcomer level swelling in a depressurizing phase and fuel rod dryout due to mixture level fall in the core agreed well with the experimental results. Moreover, the analytical models for a steam discharge flow and a steam separator were assessed and capability of the code for the analysis of a main steam line break LOCA was clarified.

Keywords: BWR, LOCA, Steam Line Break, ROSA-III Program, Integral Simulation Test, Code Assessment, RELAP5/MOD1, HPCS, Reactor Safety.

* On leave from Ship Research Institute, Ministry of Transport

目 次

1. 緒言	1
2. 実験装置及び実験結果	3
2.1 ROSA-Ⅲ実験装置	3
2.2 100%主蒸気管破断実験・RUN 952の概要	5
3. 解析モデル及び解析条件	23
3.1 実験解析と感度解析	23
3.2 解析モデルと入力データ	23
4. 実験解析の結果	38
4.1 炉内圧力変化	38
4.2 主蒸気管の破断流量	38
4.3 ダウンカマー水位とボイド率	40
4.4 炉心の燃料表面温度と流体挙動	41
4.5 下部プレナムの流体挙動	44
5. 感度解析の結果	59
5.1 蒸気流に対する放出係数の影響	59
5.2 セパレーター・モデルの影響	61
5.3 圧力容器壁の蓄積熱の影響	64
6. 結言	90
謝 辞	91
参 考 文 献	91
付 録	92

Contents

1. Introduction	1
2. Experiment Facility and Experiment Result	3
2.1 ROSA-III Experimental Facility	3
2.2 Overview of a 100% Steam Line Break Test, RUN952	5
3. Analytical Model and Condition	23
3.1 Experimental Analysis and Parametric Study	23
3.2 Analytical Model and Input Data	23
4. Experiment Analysis	38
4.1 System Pressure Transient	38
4.2 Break Flow through Steam Line	38
4.3 Water Level and Void Fraction in Downcomer	40
4.4 Fuel Rod Surface Temperature and Fluid Behavior in Core	41
4.5 Fluid Behavior in Lower Plenum	44
5. Parametric Study	59
5.1 Effect of Discharge Coefficient on Break Flow	59
5.2 Effect of Separator Model	61
5.3 Effect of Stored Heat Release from Pressure Vessel Wall	64
6. Conclusion	90
Acknowledgment	91
References	91
Appendix	92

List of Tables and Figures

- Table 2.1 Primary characteristics of BWR/6 and the ROSA-III facility
- Table 2.2 Instrumentation list
- Table 2.3 Test conditions of the ROSA-III test RUN952
- Table 2.4 Sequence of test procedures and events in RUN952
- Table 3.1 Analysis conditions for each case
- Table 3.2 Description of nodalized components for RELAP5/MOD1 code
(Case S)
- Table 3.3 Flow area of No.4 ROSA-III simulated fuel assembly
- Table 3.4 Input data of initial pressure and temperature in each component
-
- Fig. 2.1 Schematic diagram of the ROSA-III test facility
- Fig. 2.2 Internal structure of the pressure vessel of ROSA-III
- Fig. 2.3 Arrangement of heater rod
- Fig. 2.4 Axial power distribution of heater rod
- Fig. 2.5 Steam discharge line
- Fig. 2.6 Details of orifice (OR-5)
- Fig. 2.7 Feedwater line between AV112 and the pressure vessel
- Fig. 2.8 Instrumentation location in pressure vessel of ROSA-III
- Fig. 2.9 Flow diagram and instrumentation of the ROSA-III facility
- Fig. 2.10 Experiment result (pressure in lower plenum)
- Fig. 2.11 Experiment result (discharged flow rates measured by orifice-type flow meter (O) and drag-disk flow meter (D))
- Fig. 2.12 Experiment result (collapsed water levels in the pressure vessel estimated from differential pressure data)
- Fig. 2.13 Experiment result (fuel rod surface temperatures of All rod)
- Fig. 2.14(a) Experiment result (mixture levels in core)
- Fig. 2.14(b) Experiment result (dryout and quench behaviors in high power channel (A) related with liquid level)
-
- Fig. 3.1 Nodalization for ROSA-III analysis (Case S)
- Fig. 3.2 Input data of initial mass flow rates
- Fig. 3.3 Electric power curve for RUN952
- Fig. 3.4 Single-phase four quadrant head curves for the ROSA-III recirculation pump (MRP1)
- Fig. 3.5 Single-phase four quadrant torque curves for the ROSA-III recirculation pump (MRP1)
-
- Fig. 4.1 Analysis compared with exp. data (lower plenum pressure)

- Fig. 4.2 Analysis compared with exp. data (steam flow rate)
- Fig. 4.3 Calculated fluid quality upstream the break (Case S)
- Fig. 4.4 Analysis compared with exp. data (differential pressure across the lower downcomer)
- Fig. 4.5 Analysis compared with exp. data (upper downcomer water level)
- Fig. 4.6 Analysis compared with exp. data (void fraction in the downcomer)
- Fig. 4.7(a) Analysis compared with exp. data (differential pressure between lower plenum and steam dome)
- Fig. 4.7(b) Analysis compared with exp. data (collapsed water levels in pressure vessel)
- Fig. 4.8 Calculated void fraction in the high-power channel in the core
- Fig. 4.9 Calculated flow rate through the average-power channel in the core
- Fig. 4.10 Analysis compared with exp. data (fuel surface temperature at Position 1 of All rod)
- Fig. 4.11 Analysis compared with exp. data (fuel surface temperature at Position 2 of All rod)
- Fig. 4.12 Analysis compared with exp. data (fuel surface temperature at Position 3 of All rod)
- Fig. 4.13 Analysis compared with exp. data (fuel surface temperature at Position 4 of All rod)
- Fig. 4.14 Analysis compared with exp. data (fuel surface temperature at Position 5 of All rod)
- Fig. 4.15 Analysis compared with exp. data (fuel surface temperature at Position 6 of All rod)
- Fig. 4.16 Analysis compared with exp. data (fuel surface temperature at Position 7 of All rod)
- Fig. 4.17 Calculated steam velocities at the exits of core and core-bypass
- Fig. 4.18 Calculated flow rate at the exit of core-bypass
- Fig. 4.19 Calculated void fraction in the lower plenum and core-inlet chamber
- Fig. 4.20 Calculated flow rates into the lower plenum from jet pumps in the intact and broken loops
- Fig. 5.1 Effect of discharge coefficient on the steam discharge flow rate (Cases A and D)
- Fig. 5.2 Effect of discharge coefficient on the lower plenum pressure (Cases A, S and D)

- Fig. 5.3 Calculated differential pressure across the lower downcomer (Case D)
- Fig. 5.4 Calculated differential pressure between the lower plenum and steam dome
- Fig. 5.5 Effect of discharge coefficient on the void fraction in the high-power channel (Cases S and D)
- Fig. 5.6 Effect of discharge coefficient on the fuel surface temperature at Position 1 of high-power channel (Cases S and D)
- Fig. 5.7 Effect of discharge coefficient on the fuel surface temperature at Position 2 of high-power channel (Cases S and D)
- Fig. 5.8 Effect of discharge coefficient on the fuel surface temperature at Position 3 of high-power channel (Cases S and D)
- Fig. 5.9 Effect of discharge coefficient on the fuel surface temperature at Position 4 of high-power channel (Cases S and D)
- Fig. 5.10 Effect of discharge coefficient on the fuel surface temperature at Position 5 of high-power channel (Cases S and D)
- Fig. 5.11 Effect of discharge coefficient on the fuel surface temperature at Position 6 of high-power channel (Cases S and D)
- Fig. 5.12 Effect of discharge coefficient on the fuel surface temperature at Position 7 of high-power channel (Cases S and D)
- Fig. 5.13 Effect of separator model on flow rates through the separator (Cases S and B)
- Fig. 5.14 Effect of separator model on steam velocities through the separator (Cases S and B)
- Fig. 5.15 Effect of separator model on steam discharge flow rate (Cases S and B)
- Fig. 5.16 Effect of separator model on fluid quality upstream the break (Cases S and B)
- Fig. 5.17 Effect of separator model on lower plenum pressure (Cases S and B)
- Fig. 5.18 Effect of separator model on void fraction in the downcomer (Cases S and B)
- Fig. 5.19 Effect of separator model on flow rates at the steam dome (Cases S and B)
- Fig. 5.20 Effect of separator model on void fraction in the high-power channel (Cases S and B)
- Fig. 5.21 Effect of separator model on fuel surface temperature at Position 1 of high-power channel (Cases S and B)

- Fig. 5.22 Effect of separator model on fuel surface temperature at Position 2 of high-power channel (Cases S and B)
- Fig. 5.23 Effect of separator model on fuel surface temperature at Position 3 of high-power channel (Cases S and B)
- Fig. 5.24 Effect of separator model on fuel surface temperature at Position 4 of high-power channel (Cases S and B)
- Fig. 5.25 Effect of separator model on fuel surface temperature at Position 5 of high-power channel (Cases S and B)
- Fig. 5.26 Effect of separator model on fuel surface temperature at Position 6 of high-power channel (Cases S and B)
- Fig. 5.27 Effect of separator model on fuel surface temperature at Position 7 of high-power channel (Cases S and B)
- Fig. 5.28 Calculated flow rate at the exit of core-bypass (Case B)
- Fig. 5.29 Calculated heat release rates into coolant from fuel rods and pressure vessel wall (Case S)
- Fig. 5.30 Effect of wall stored heat on pressure (Cases S and H)
- Fig. 5.31 Effect of wall stored heat on void fraction in the downcomer (Cases S and H)
- Fig. 5.32 Effect of wall stored heat on upper downcomer water level (Cases S and H)
- Fig. 5.33 Effect of wall stored heat on void fraction in the high-power channel (Cases S and H)
- Fig. 5.34 Effect of wall stored heat on fuel surface temperature at Position 1 of high-power channel (Cases S and H)
- Fig. 5.35 Effect of wall stored heat on fuel surface temperature at Position 2 of high-power channel (Cases S and H)
- Fig. 5.36 Effect of wall stored heat on fuel surface temperature at Position 3 of high-power channel (Cases S and H)
- Fig. 5.37 Effect of wall stored heat on fuel surface temperature at Position 4 of high-power channel (Cases S and H)
- Fig. 5.38 Effect of wall stored heat on fuel surface temperature at Position 5 of high-power channel (Cases S and H)
- Fig. 5.39 Effect of wall stored heat on fuel surface temperature at Position 6 of high-power channel (Cases S and H)
- Fig. 5.40 Effect of wall stored heat on fuel surface temperature at Position 7 of high-power channel (Cases S and H)
- Appendix Input data of standard case (Case S) for the 100% steam line break test, RUN952

1. 緒 言

軽水炉の工学的安全性の研究が近年各国で活発に展開されてきた。その中心は、当初は冷却材喪失事故（LOCA）や反応度事故（RIA）等のいわゆる設計基準事故の現象解明及び解析手法の確立にあった。しかし、1979年3月28日の米国スリーマイル島原子力発電所2号炉の事故を契機として、従来の事故範ちゅうの見直しが進み、これまで十分解明されていなかった事故や、現実には起こりうる小破断事故、異常な過渡現象、およびそれらの組み合わされた複合事故等を研究対象とする方向へ重点が移ってきた。これらの種々の事故現象を研究するため、従来にまして実際の軽水炉の設計条件やプラント特性、安全システムの作動条件等を含む詳細な資料が必要となり、また一層信頼性の高い解析手法が必要となってきた。

本報は、ROSA-Ⅲ装置⁽¹⁾において実施した主蒸気管破断シリーズの1つ、高圧炉心スプレイ系（HPCS）を作動させた100%破断実験（RUN 952）の解析をまとめたものである。この100%主蒸気管破断実験は、BWRの定格運転状態において4本ある主蒸気配管のうちの1本が格納容器内側において瞬時破断したことによって生じるLOCA現象を模擬することを目的として実施されたものである。従来、BWRの重大事故としては、再循環ループ配管における大口徑破断事故が最も炉心冷却条件を悪くすると考えられてきた。また、ROSA-Ⅲ計画⁽²⁾としても再循環ループ破断実験^{(3)~(8)}を中心に実験をすすめてきた。しかしROSA-Ⅲにおいて実施した主蒸気管破断シリーズの実験では、2章に述べるように上部ダウンカマール水位が再循環ループ破断の場合に比べて高く維持され、炉心側水位は上部ダウンカマール水位より低くなる事等、再循環ループ配管破断事故と異なる特徴的現象が生じる事がわかった。また、BWR/6の安全評価解析⁽⁹⁾において、主蒸気管破断事故時には炉心水位が保持され炉心が露出することはないとされていたが、ROSA-Ⅲの結果は、ある条件下では炉心露出もありうることを示した。さらに、上部ダウンカマール水位はBWRの運転制御・監視系統の中でも重要なものの1つであり、この水位が低下せず通常水位に近い挙動を示すことは運転員にECC水の注入を制限させたりその他の誤判断を生じさせる可能性も考えられる。そのため、上記のROSA-Ⅲ主蒸気管破断実験を詳細に解析し、かつ解析コードの性能評価を行なうことが必要となった。

これまでに行なわれてきたBWRの主蒸気管破断事故に関する実験的研究としては、単一圧力容器内の減圧速度と残存量・水位のスエリング等の基礎的研究はあるが、BWR体系を模擬した総合的な実験的研究はROSA-Ⅲ実験が初めてである。ROSA-Ⅲにおける主蒸気管破断実験は、格納容器内外の破断位置の相違、破断面積10~100%、ECCS故障モード等をパラメータにとり計7RUN実施しており、これらの結果はROSA-Ⅲ実験データレポートとして順次公開される予定である。このROSA-Ⅲ実験装置は、大型商用BWRのLOCA/ECCS現象に関する実験的解明を行なうことと、LOCA解析コードの性能評価に必要な実験データを提出することを目的とし、1978年3月から1983年3月まで種々の実験を実施してきた。上記主蒸気管破断実験は、1982年7月14日に実施したものである。この装置は、BWR/6（251-848）の原子炉冷却系統を容積比1/424に模擬し、2つの再循環ループ、電気加

の炉心、気水分離器、主蒸気及び給水系統、ECCS、ダウンカマの水位測定とそれによる制御ロジックを備えており、またBWR体系のLOCA時の過渡的熱流動現象を同じタイムスケールで模擬するように設計されている。実験装置の特徴、RUN952実験の実験条件、方法については2章に記す。

本解析に使用したLOCA解析コードはRELAP5/MOD1/CY1⁽¹⁰⁾である。使用した解析モデル及び入力データについては第3章に示してある。解析としては、まず、LOCA解析上重要な指標となる系圧力と主蒸気管の蒸気流出流量の計算結果が最もよく実験結果と合う場合において、圧力容器内の水位、ボイド率、燃料棒表面温度挙動等について詳細な比較を行ない、主蒸気管破断実験RUN952で見られたそれらの物理的事象を上記解析コードによりどの程度裏づけることができるかを調べた。これは、前述したように圧力容器内の現象が、再循環ループ大破断の場合と異なるので、破断口における質量とエネルギーの境界条件が一致した条件下で圧力容器内の現象に焦点を当てて、現象の確認、およびコードの性能評価をするものである。この結果を第4章に示す。次に主蒸気管破断実験の解析を行なう上で大きな影響を持つ、蒸気臨界流に対する放出係数と気水分離器モデルについて感度解析を実施した。ここでは、ダウンカマ水位に影響を及ぼすと考えられる圧力容器壁の蓄積熱の影響についても感度解析を実施したので、合わせて第5章に示した。これらの結果を総合し、主蒸気管大破断事故に対する上記解析コードの性能評価を6章に示した。

2. 実験装置及び実験結果

2.1節に実験装置の特徴を、2.2節には100%主蒸気管破断実験RUN952の実験条件・方法・結果を示す。

2.1 ROSA-III実験装置

(1) 装置の基本的設計思想

ROSA-III実験装置は、大型商用BWRにおけるLOCA/ECCS現象を模擬した総合実験を行なうものである。Table 2.1にBWR/6と比較したROSA-III装置の主要諸元を示す。

実験装置の基本的設計思想は、BWRで生じると想定される事故時の熱流体现象が、実験装置において1/424のスケール比で同じ時間変化するよう模擬することにある。このためROSA-III装置はBWR冷却系内の主要機器と同様の構成から成り立っている。冷却系各部流体容積の炉心流体容積に対する比率は、実炉のそれとほぼ同じである。次に、破断口面積とその他の位置で二相臨界流閉塞を生じる可能性のある部分の流路面積、例えばジェットポンプ駆動ノズルとスロート部の流路面積を実炉の1/424に設定した。また、ECC水の注入流量、自動減圧系の流路面積も同じスケール比とした。これらは系全体のインベントリを模擬する上で必要なものである。

一方冷却系内の流量も同じスケール比で模擬することを基本とした流動抵抗を考えたが、炉心については高さが実炉の1/2（横断面積についてはスケール比の2倍）であり、1燃料集合体当り蒸気発生量は実炉比1/2となるため、炉心入口オリフィスと上部グリッドの流路面積についてはその流速を実炉条件と合わせるために実炉の1/2流路面積を基準とした。これはそれらの位置でのCCFL（気液対向流制限）に流速が大きな影響を持つと考えたからである。また、冷却系各部の相対的高さ関係を実炉と同様にしたが、スチームドームや下部プレナムの高さについては相対的に低く（容積比は等しく）なっている。これらにより、冷却系各部の残存水量の時間変化も実炉条件と同傾向になると考えられる。

炉心の熱出力条件のうち初期熱出力は、スケール比1/424の実炉の熱出力の44%であるが、破断後9秒間一定値に保ち9秒以後の流体への熱伝達量を模擬している。この過渡熱出力変化は、RELAP4JコードによるBWR6の大破断LOCA時の炉心熱伝達量の計算値をもとにしたものである。

一方、装置上実炉条件を模擬できていない点としては、ジェットポンプを圧力容器外に設置しているため吸込及び吐出配管の流動抵抗が大きいこと、圧力容器や配管等構造材の蓄積熱が流体の熱容量に比較して実炉より大きい事等があるが、圧力容器壁蓄積熱放出の影響以外の点についての相似性の検討は別の機会に報告する予定である。以上の点はROSA-III装置に関する一般的特徴であり、以下に各部（機器）の詳細と、100%主蒸気管破断実験用に変更した点について述べる。

(2) 圧力容器と内部構造物, 炉心

Fig. 2.1 に ROSA-III の全体図を示す。ROSA-III 装置は圧力容器, 2 つの再循環ループ, 蒸気及び給水系統, ECCS 系統を持ち, この他に制御・計測・データ集録システムを備えている。圧力容器内には Fig. 2.2 に示すように, 炉心とバイパス部, 下部プレナムと制御棒案内管, 上部プレナム, 気水分離器, 蒸気ドーム, ダウンカマー, 給水スパージャーと ECCS 配管等がある。

炉心には $\frac{1}{2}$ 実長の 4 体の燃料集合体があり, それぞれの燃料集合体には 62 本の電気ヒーターロッドと 2 本のウオーターロッドが 8×8 の正方配列に配置されている (Fig. 2.3)。ヒーターロッドは, 有効発熱長 1.88 m で軸方向ピーキング・ファクター 1.4 の階段状コサイン発熱分布を持っている (Fig. 2.4)。燃料集合体間には 1.4 (高出力チャンネル; A) と 1.0 (平均出力チャンネル; B, C, D) の半径方向ピーキング・ファクターがついている。これらのピーキング・ファクターは実炉条件と同じである。最高出力部の線出力密度は 16.58 kW/m であり, 実炉の最高出力部のその 41% に相当する。

(3) 再循環ループ

2 つのループの 1 方を健全ループ, 他の 1 方を破断ループと呼ぶ。それぞれのループには, 再循環ポンプ (MRP) 1 台とジェットポンプ (JP) 2 台が設置されている。再循環ポンプは破断開始後, 電源を遮断し, 以後自然減衰する。ジェットポンプは, 炉心との相対高さ及び容積比, 定常状態の M-N 特性を実炉と同じにするため圧力容器外に設置した。

(4) 蒸気及び給水系

蒸気系は, Fig. 2.5 に示すように蒸気ドームを出たあと 3 系統に分かれ, それぞれ定常, ADS, 破断ラインと呼ぶ。破断前は定常ラインを使用し圧力制御を行なう。破断と同時に定常ラインを急速閉鎖し, 破断ラインを急速開放する。この所要時間は設計条件では 0.1 秒以内である。RUN952 では, この破断ラインに破断口を模擬するオリフィス (OR-5, Fig. 2.6) が設置されており, これは BWR/6 の主蒸気管 1 本の流路面積の $1/424$ に相当する口径 (3.10 mm) を有している。破断後, 流出蒸気はこのオリフィスを経て破断ユニット B を通り外気へ放出される。

給水系は, Fig. 2.7 に示すように加熱器, 給水ポンプを経てダウンカマー部のスパージャーに至る。給水温度は 489 K である。なお, 給水停止後, 圧力容器ノズルより閉鎖弁 (AV112) までの給水配管内には $3.6 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ の温水が残存しており, これは系圧力 2.2 MPa になるとフラッシングして圧力容器内に流入する。これは実炉でも同様である。

(5) 非常用炉心冷却系

ROSA-III には 3 種類の ECCS, 即ち高圧炉心スプレイ (HPCS), 低圧炉心スプレイ (LPCS) 及び低圧注入 (LPCI) の各系統と ADS があり, それぞれの流量は実炉条件をスケール比 $1/424$ で模擬している。BWR/6 においては, HPCS は格納容器内圧高又は原子炉水位低 (L2) 信号で起動し, LPCS 及び LPCI は, 格納容器内圧高又は原子炉水位 (上部ダウンカマー水位) 低 (L1) のいずれか 1 方の信号と系圧力低下の信号とにより起動されるロジックになっている。格納容器内での 100% 主蒸気管破断の場合には格納容器内圧高の信号が早期に作動するので, HPCS は破断後早期に (外部電源喪失時にはディーゼル発電機の起動時間 (27 秒) 後に, また

LPCSとLPCIはそれぞれの注入設定圧力に系圧力が低下した時点で起動することになる。ROSA-Ⅲ実験RUN952では、格納容器内圧高の信号がない場合、即ち水位信号に基づいて全ECCSを作動させるように設定したが、HPCSのみが作動した。このことについては後述の実験結果2.2節において詳しく述べる。RUN952ではADSは不動作とした。

(6) 計測およびデータ集録システム

Table 2.2にデータ集録システムに記録される計測量を示す。系圧力や差圧、流量、燃料温度等、計416チャンネルについて、10Hzの集録速度で集録した。Fig. 2.8とFig. 2.9に圧力容器内及びシステム全体の主な計測量とその測定位置を示す。制御ロジックに使用する上部ダウンカマー水位は、Fig. 2.8で蒸気ドーム(DL6040mm)とダウンカマー中部(DL3900mm)間の差圧から求めた。蒸気ラインの流量は、Fig. 2.5に示すオリフィス型流量計(F1, F2)と、Fig. 2.9に示す破断口B上流側のドラグディスク(M4)とガンマー線密度計(DF9, DF10)による流量計の2種類の測定を行なった。前者は蒸気単相流出時に正しい値を示す。後者の流量測定は二相流出時にも比較的精度のよいデータを与えるものである。本文中では前者の流量に(O)、後者の流量に(D)と記号をつけ両者を区別するものとする。

2.2 100%主蒸気管破断実験RUN952の概要

(1) 実験条件及び実験方法

RUN952の主な実験条件をTable 2.3に示す。この初期圧力、炉心を含む系内のエンタルピー分布はBWR/6の定格運転状態を模擬している。初期水位は5.07m(DL5070mm)であり、BWR/6のスクラム水位(L3)を模擬している。炉心の熱出力3.962MWは実炉条件の44%に相当するが、炉心流量も実炉条件の46%に低下しており、炉心入口サブクール度と出口クオリティを実炉条件に合わせた。炉心バイパス流量は全流量の10%である。

破断後の過渡条件としては、スクラム、主蒸気隔離弁(MSIV)閉鎖および再循環ループポンプ電源停止はいずれも破断直後に生じるとした。これらはBWR/6体系での実際の作動時刻と若干異なるが、実験条件としては上記のように単純化したモデルにした。炉心の熱出力は、破断後9秒間一定に保ったのち、BWR再循環ループ大破断時の炉心流体への伝熱量の計算値⁽¹¹⁾に沿って変化させた(Ref. Fig. 3.3)。給水系は1.3秒から3.2秒にかけて停止した。実験開始は破断信号により破断口Bの急速放出弁を開き、定常蒸気ラインを閉鎖し、破断蒸気ラインを開放することにより行なった。詳しい事象の変化は次に述べる。

(2) 主な実験結果

次章に示す実験解析の比較対象であるRUN952の主な実験結果について以下に示す。Table 2.4にRUN952の主な事象の推移、また、下部プレナム圧力、蒸気流出流量、HPCS注入流量、ダウンカマー水位とシュラウド内collapsed水位、燃料棒表面温度及び炉心混合水位の変化をFig. 2.10からFig. 2.14に示す。以下にROSA-Ⅲ再循環ループ大口径破断実験と比較しつつ特徴的事象を述べる。

まず系圧力変化については、破断と同時に減少開始し、4.2秒の下部プレナムフラッシング開始後やや減圧速度が低下し、以後単調な減圧がつづく(図2.10)。実炉の主蒸気管破断事故

では、主蒸気管圧力低下等のトリップ信号により主蒸気管隔離弁（MS IV）が破断からややおくれで閉鎖されると想定されているが、ROSA-Ⅲ実験では破断と同時にMS IV閉鎖が生じ、破断流量のみが主蒸気管を通過して流出したことを模擬している。なお、BWRの主蒸気管は再循環ループ配管より太く、前者の流路面積の100%は後者の140%に相当する。破断流のクオリティが高いため、初期減圧速度の大きさに比べ系内の残存水量は多く、ブローダウン後半の減圧速度はかなり小さくなるという蒸気ライン破断の特徴が示されている。

Fig. 2.11に、主蒸気管を経て破断口に流出した流出流量の測定値を示す。前に述べたように、オリフィス型流量計（O）とドラッグディスク・密度計による流量計（D）の2種類の流量計測を行なった。オリフィス型流量計の場合、破断前から破断後4.2秒のフラッシング開始時刻までの間は正しい値を与える。ドラッグディスクと密度計による流量はこの間やや大きい値を示しているが、これは、急激な状態変化に伴う計器の誤差及び流量校正が不十分であることによる。一方、4.2秒～40秒にかけて、およびHPCS水の注入開始後の94秒以後の時間帯には、後者の流量（D）には二相流流出による重量流量の増加が認められるが、前者の流量（O）にはこの傾向が示されていない。それぞれの測定原理と上記の点とから、破断初期には流量（O）が、フラッシング開始後は流量（D）がより正しい流量を示すものと考えられる。

Fig. 2.12に圧力容器内の水位変化を示す。ダウンカマーとシュラウド内（炉心側）のcollapsed水位は、対応する差圧データから換算して求めたものであり、流れの圧損項を無視できる場合には残存水量を示す目安となる。ダウンカマー水位は破断直後やや高くなり、フラッシング開始後に0.4mの水位回復を示す。RUN952では4.2秒以後ダウンカマーボイド率は急速に増加し、最高56%に達した。上部ダウンカマー（DL3.90～6.04m）の水位回復（スエリング）はこうした急激なボイド率増加によるものである。ROSA-Ⅲの再循環ループ大破断実験に比べて上部ダウンカマー水位の低下がおくれ、炉心シュラウド内水位より高く保持された。シュラウド内水位はHPCS注入開始後徐々に回復し、ダウンカマー水位はHPCS注入開始から281秒後に回復を開始した。

この時の炉心の燃料表面温度挙動は、Fig. 2.13に示すように、破断後30秒から上昇開始し、水位低下に伴って上から下へ順次ドライアウトしたことを示している。この燃料棒のクエンチは、HPCS注入開始後、炉心下部から開始し、順次上方へ進行した。他のROSA-Ⅲ実験では、スプレー水流下による炉心上部のクエンチも見られることを考えると、これは、上部プレナムに注入されたHPCS水が炉心上端からほとんど流下せず、バイパス部を通り炉心の下部から流入したことによるものであり、炉心上端ではCCFL（気液対向流制限）が生じていたことを示している。こうしたドライアウト・クエンチ挙動は、燃料集合体内及び集合体間でややばらつきはあるものの、ほぼ一様に進行した。Fig. 2.14(a)に示す炉心内混合水位の変化は、Fig. 2.16(b)に示す燃料棒のドライアウト・クエンチ挙動とよく一致しており、水位形成が燃料棒冷却に支配的影響をもつこと、即ち水位支配型の燃料表面温度挙動であることを示している。燃料棒の最終クエンチは炉心上部（ポジション1）で破断後230秒（HPCS注入開始後135秒）に完了し、最高燃料被ふく管温度（PCT）は738K（465℃）であった。

Table 2.1 Primary characteristics of BWR/6 and the ROSA-III facility

	BWR-6	ROSA-III	BWR/ROSA
No. of Recirc. Loops	2	2	1
No. of Jet Pumps	24	4	6
No. of Separators	251	1	251
No. of Fuel Assemblies	848	4	212
Active Fuel Length (m)	3.76	1.88	2
Total Volume (m ³)	621	1.42	437
Power (MW)	3800	4.40	864
Pressure (MPa)	7.23	7.23	1
Core Flow (kg/s)	1.54x10 ⁴	36.4	424
Recirculation Flow (l/s)	2970	7.01	424
Feedwater Flow (kg/s)	2060	4.86	424
Feedwater Temp (K)	489	489	1

Table 2.2 Instrumentation list

TYPE	SENSOR	NUMBER	NOTE
PRESSURE	PRESSURE TRANSDUCER	20	
DIFFERENTIAL PRESSURE	DP CELL	60	PV AND LOOP 44 LEVEL MEASUREMENT 5 FLOW METER 11
FLUID TEMPERATURE	CA THERMOCOUPLE	129	PRIMARY LOOP 23 DTT 4 TIE ROD 28 UPPER PLENUM 10 LOWER PLENUM 10 TIE PLATE 40 BY PASS 14
FUEL ROD TEMPERATURE	CA THERMOCOUPLE	213	
SLAB SURFACE TEMPERATURE	CA THERMOCOUPLE	70	CORE BARREL 24 PRESSURE VESSEL 3 CHANNEL BOX 35 SHROUD SUPPORT 8
SLAB INNER TEMPERATURE	CA THERMOCOUPLE	9	JP DIFFUSER 4 PV WALL 5
VOLUMETRIC FLOW RATE	TURBINE METER VENTURI METER ORIFICE METER	3 4 6	ECCS LOOP 3 PRIMARY LOOP 10
MASS FLOW RATE	TURBINE METER ORIFICE METER	4 3	RECIC. LOOP 4 STEAM LINE 3
LIQUID LEVEL	CONDUCTIVITY PROBE CAPACITANCE PROBE	138 2	
DENSITY	GAMMA DENSITOMETER	10	2 BEAM GD 2 3 BEAM GD 2
MOMENTUMR FLUX	DRAG DISK	7	
SIGNAL	ON/OFF SWITCH	14	
PUMP SPEED	REVOLUTION COUNTER	2	
ELECTRIC POWER	VA METER	2	
TOTAL		696	

Table 2.3 Test conditions of the ROSA-III test RUN952

Items	Specified Value	Measured Value
Break Conditions		
Location	Main Steam Line	Main Steam Line
Type	Single-ended	Single-ended
Break Orifice Diameter (mm)	31.0	31.0
Break Area Ratio (%)	100	100
Break Initiation Logic	Full open of AV-165	Full open of AV-165
Initial Conditions		
Steam Dome Pressure (MPa)	7.35	7.35
Lower Plenum Temperature (K)	552.7 (279.5°C)	552.4 (279.3°C)
Lower plenum Subcooling (K)	10.5	10.7
Core Inlet FLOW Rate ^(*1) (kg/s)	16.0	16.6
Core Outlet Quality ^(*2) (%)	13.2	12.5
Power Generation (kW)	3960 (1260 + 2700)	3962 (1262 + 2700)
Max. Linear Heat Rate (kW/m)		
Channel A P.F. = 1.1	16.65	16.58
P.F. = 1.0	15.13	15.15
P.F. = 0.875	13.24	13.26
Channel B,C,D P.F. = 1.1	11.89	11.89
P.F. = 1.0	10.81	10.81
P.F. = 0.875	9.46	9.46
Power Simulation ^(*3)	dh + dn + sh Fig. 3.3	dh + dn + sh Fig. 3.3
Fuel Assembly Number	4	4
Water Level in PV (m)	5.0	5.07
Feed water Conditions		
Temperature (K)	489 (216°C)	491 (218°C)
Steady State Flow Rate (kg/s)	2.08	2.04
Valve Closure Time (s)	2	1.3 - 3.2

(*1) Flow rate include core bypass flow, i.e., 10 % of total flow.

(*2) Average quality in the upper plenum.

(*3) decay heat + delayed fission power + stored heat release

Table 2.3 (Cont'd)

Items	Specified Value	Measured Value
Steam Line Conditions		
Steady Steady Flow Rate (kg/s)	2.08	2.06
Transient Flow Rate (kg/s)	—	Fig. 2.11
MSIV closure	—	—
Safety Relief Valve Set Point(MPa)	8.13	not reached
ECCS Conditions		
HPCS		
Injection Location	Upper Plenum	Upper Plenum
Initiation Time t(s)	$L2^{(*4)} + 27 \leq t$	94
Initiation Pressure P(MPa)	$P \leq 8.00$	2.23
Coolant Temperature (K)	313(40°C)	313(40°C)
Injection Flow Rate (m ³ /s)	6.17×10^{-4}	
LPCS		
Injection Location	Upper Plenum	Upper Plenum
Initiation Time t(s)	$L1^{(*4)} + 40 \leq t$	not actuated
Initiation Pressure P(MPa)	$P \leq 2.16$	—
Coolant Temperature (K)	313(40°C)	—
Injection Flow Rate (m ³ /s)	1.13×10^{-3}	—
LPCI		
Injection Location	Top of Core Bypass	Top of Core Bypass
Initiation Time t(s)	$L1 + 40 \leq t$	not actuated
Initiation Pressure P(MPa)	$P \leq 1.57$	—
Coolant Temperature (K)	313(40°C)	—
Injection Flow Rate (m ³ /s)	3.50×10^{-3}	
ADS Conditions	not used	not used

(*4) L1: Water level in the downcomer, 4.25 m from PV bottom.

L2: Water level in the downcomer, 4.76 m from PV bottom.

Table 2.4 Sequence of test procedures and events in RUN952

Time (s)	Procedures and Events
-122	• Initiation of data recording by DATAC 2000B system
- 10	• Initiation of data plotting in the figures
0.0	• Initiation of break in the main steam line Break Valve opening (AV-165 was opened and AV-168 was closed)
	• MRP1 coastdown
	• MRP2 coastdown
	• Initiation of system pressure decrease
1.3	• Initiation of feedwater line closure (completed at 3.2 s)
4.2	• Initiation of lower plenum flashing.
9.0	• Initiation of core power decrease
71	• Liquid level in the upper downcomer decreased to L2 level
94	• HPCS actuation (at system pressure 2.23 MPa)
95	• Initiation of feedwater flashing
140	• PCT at Position 3 of All rod (ch. 203), 738 K
170	• Initiation of mass recovery in the core shroud
376	• Initiation of liquid level recovery in the upper downcomer. (at 4.28 m from PV bottom)
450	• Termination of data plotting (except for Figs. 3.63 through 3.74)
1017	• LPCI manual injection
1183	• Termination of data recording

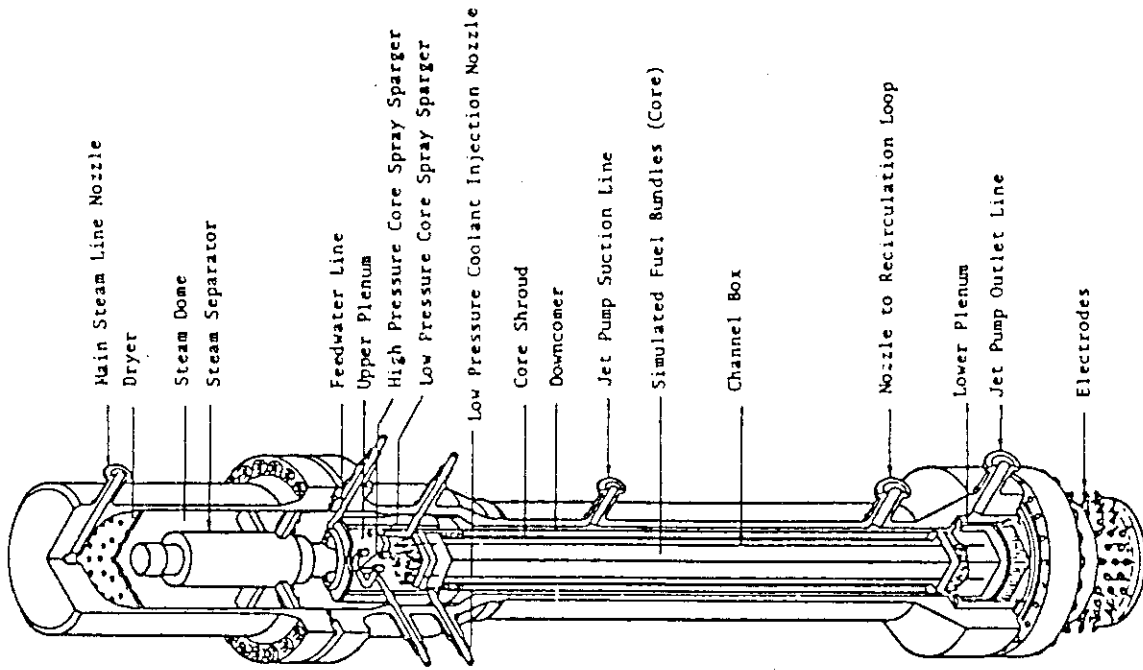


Fig. 2.2 Internal structure of the pressure vessel of ROSA-III

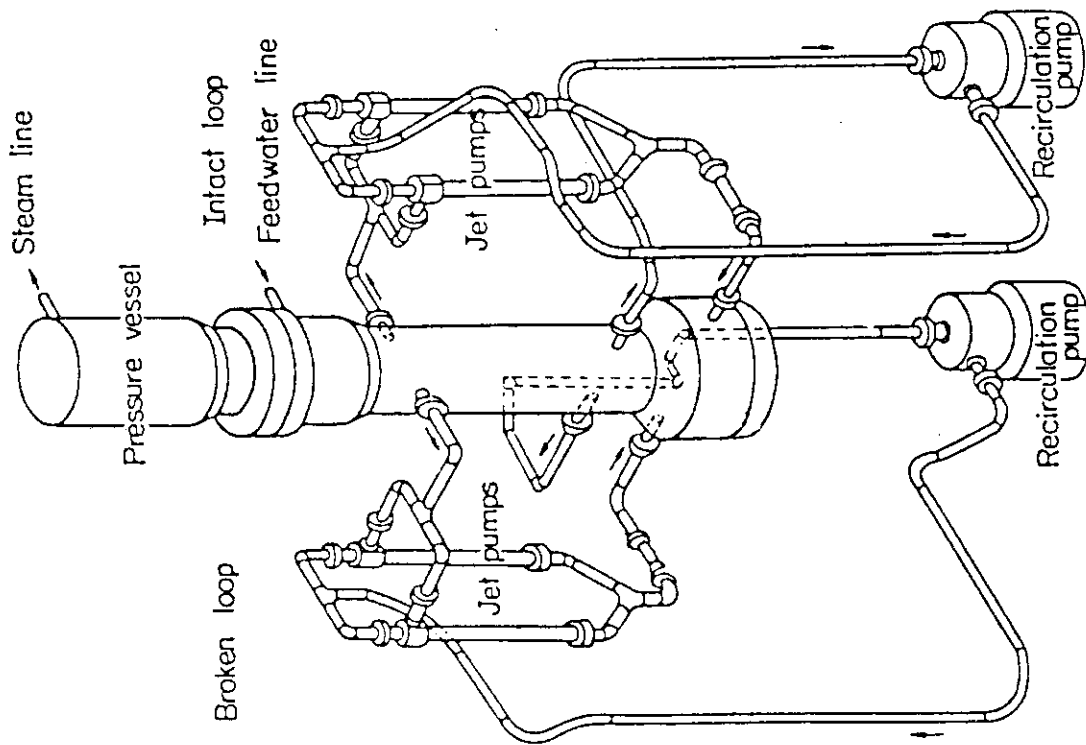
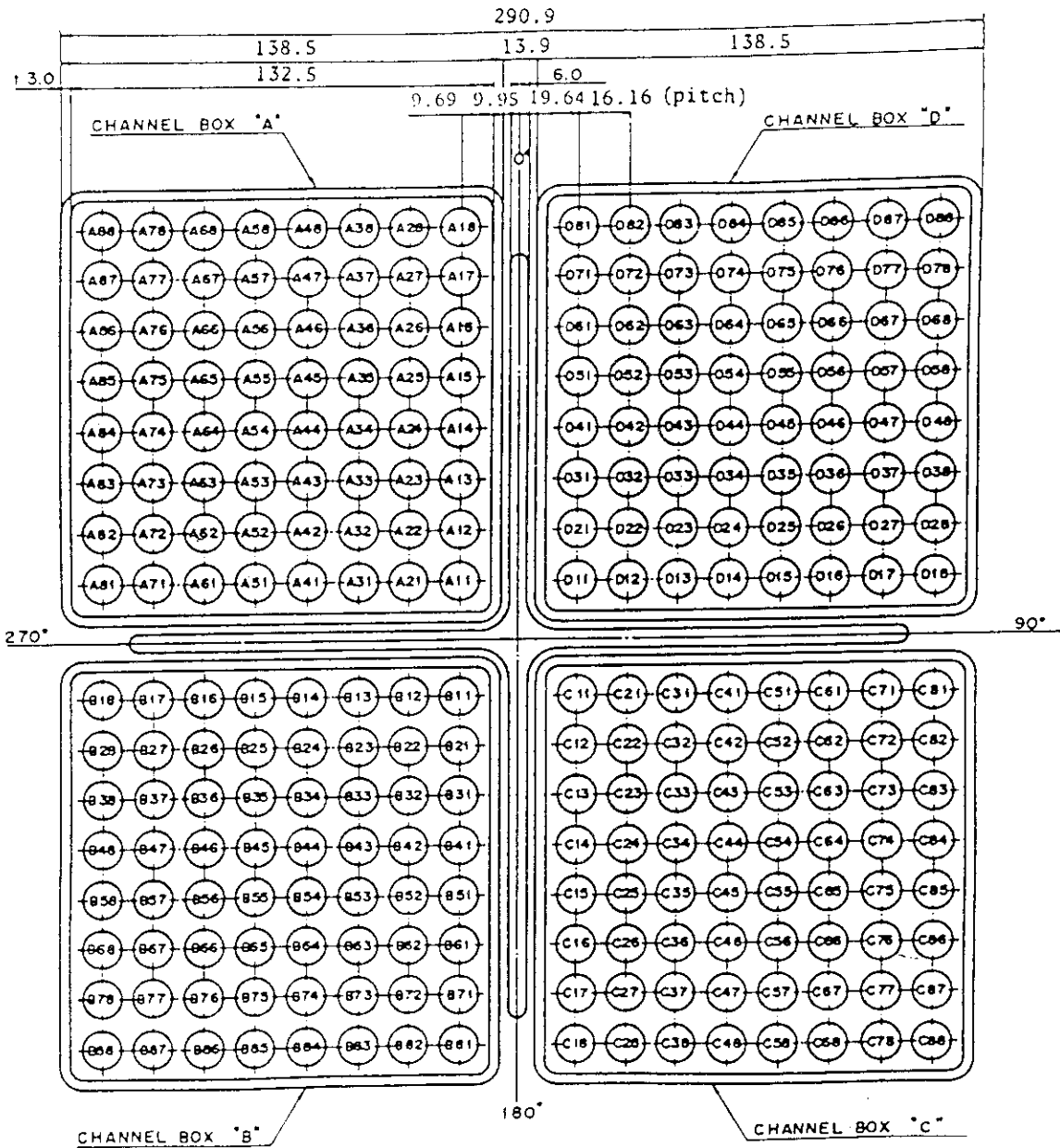


Fig. 2.1 Schematic diagram of the ROSA-III test facility



Heater rod O.D. is 12.27mm

A54, B54, C54 and D54 are water rod simulators with void probes,
O.D. = 15.01mm

A45, B45, C45 and D45 are water rod simulators with thermocouples,
O.D. = 15.01mm

Fig. 2.3 Arrangement of heater rod

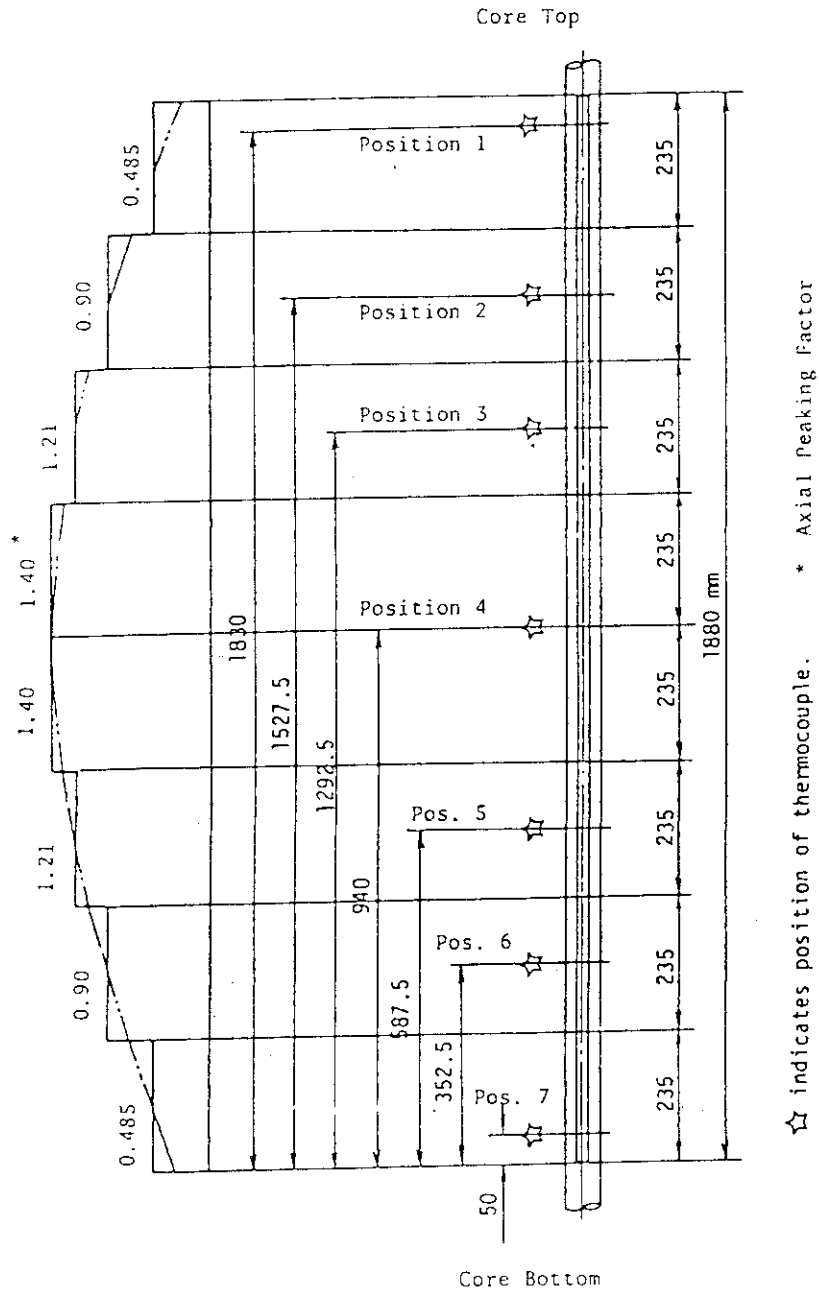


Fig. 2.4 Axial power distribution of heater rod

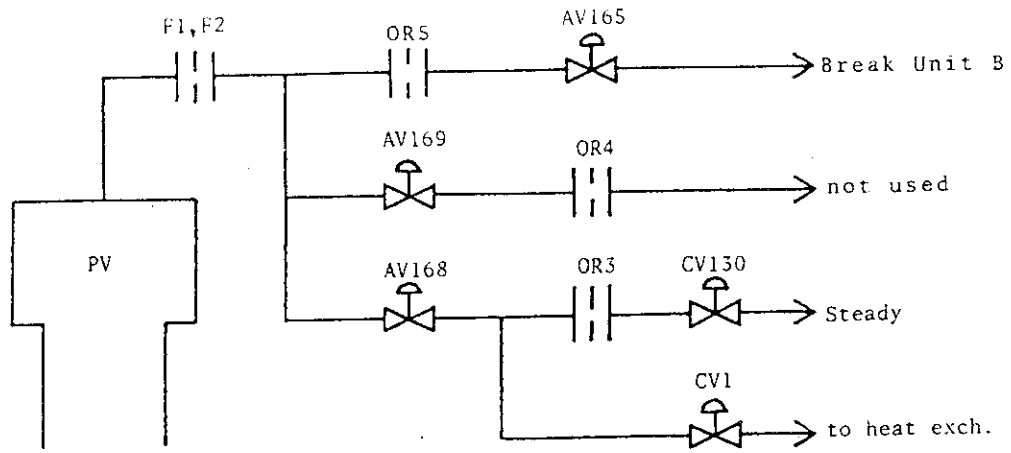


Fig. 2.5 Steam discharge line

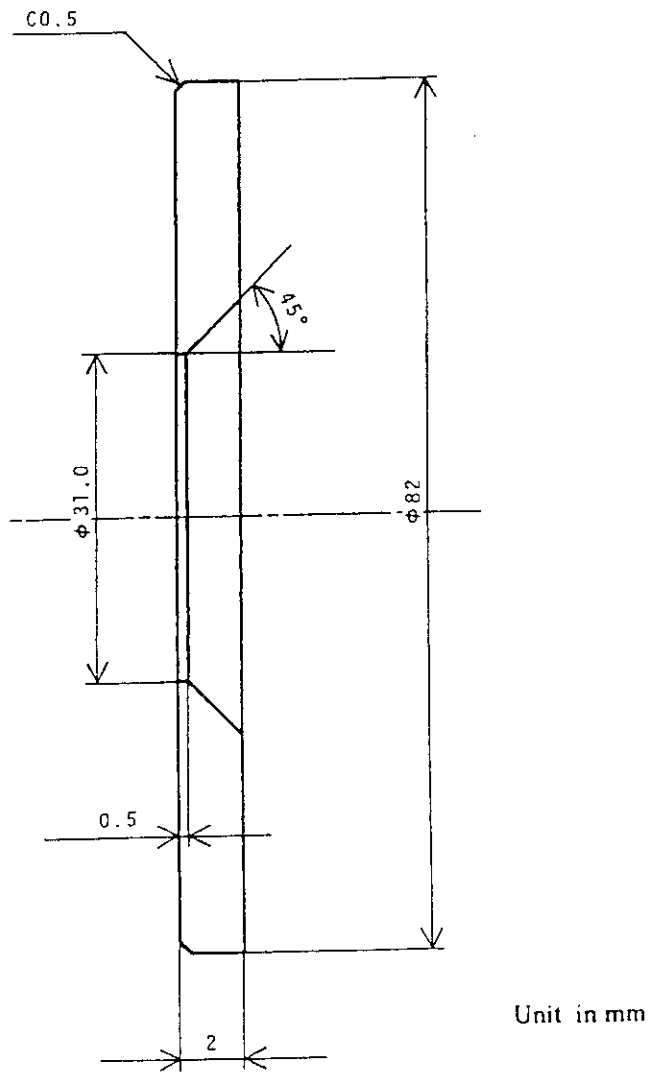


Fig. 2.6 Details of orifice (OR-5)

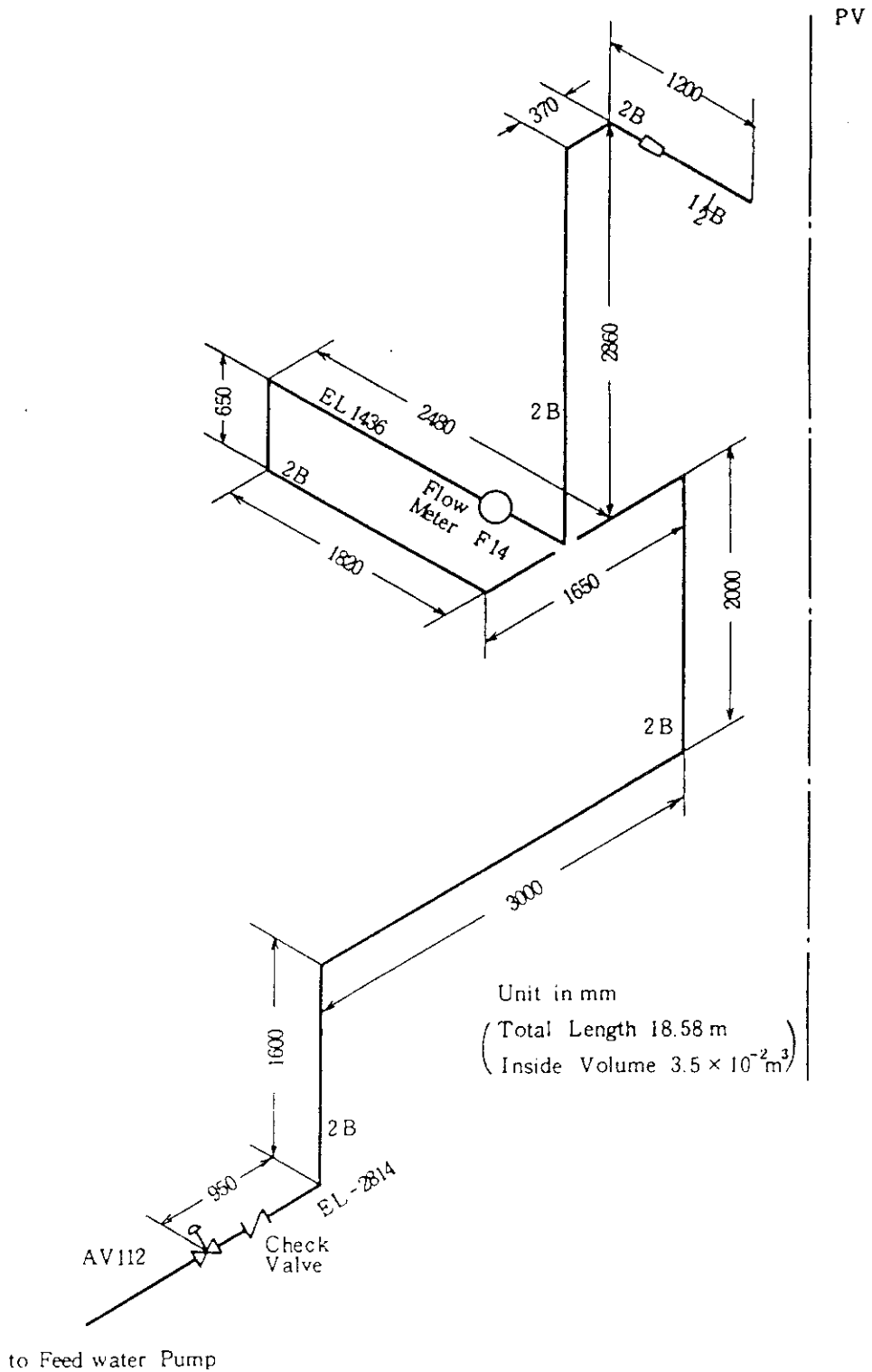


Fig. 2.7 Feedwater line between AV112 and the pressure vessel

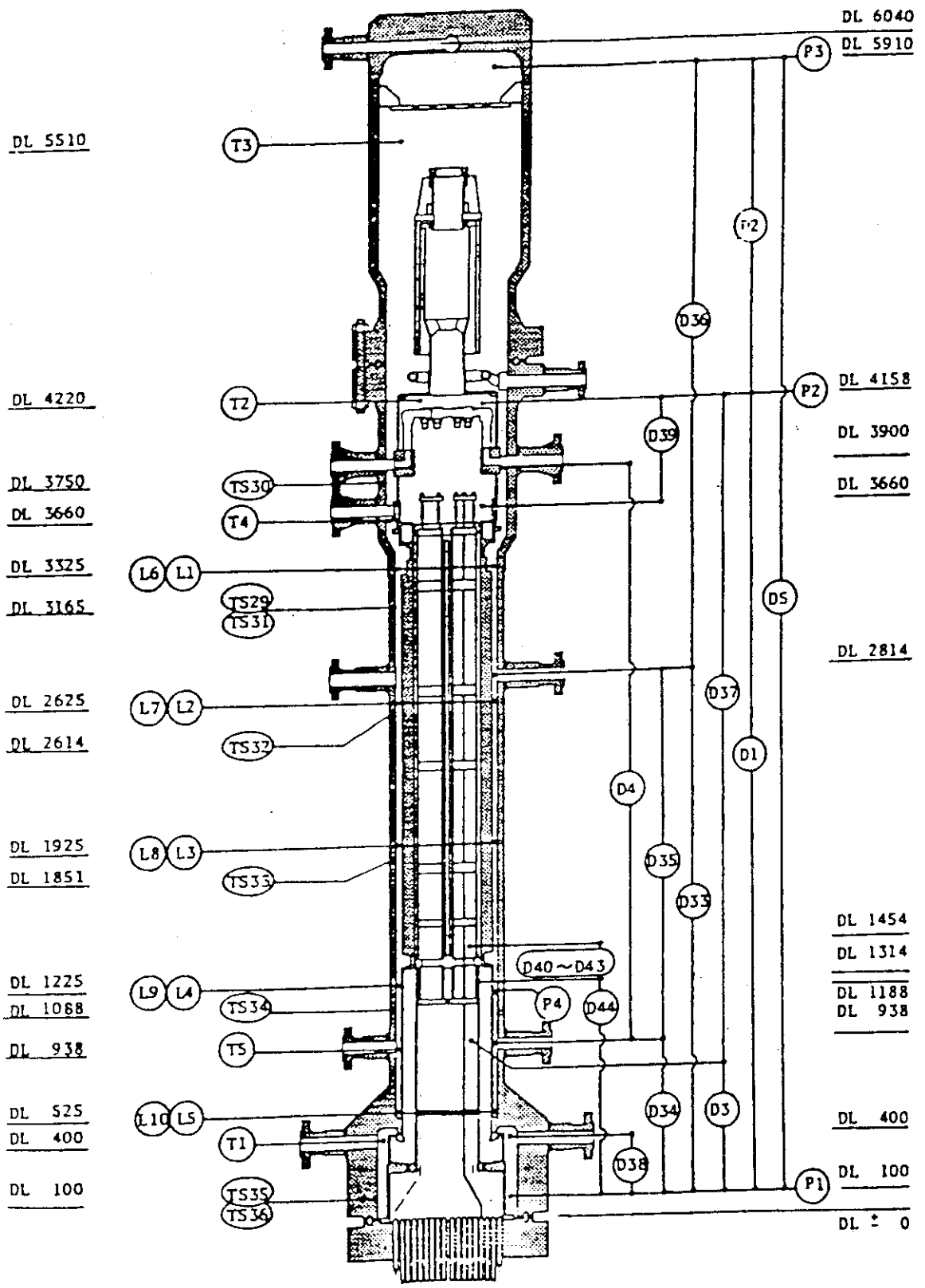


Fig. 2.8 Instrumentation location in pressure vessel of ROSA-III

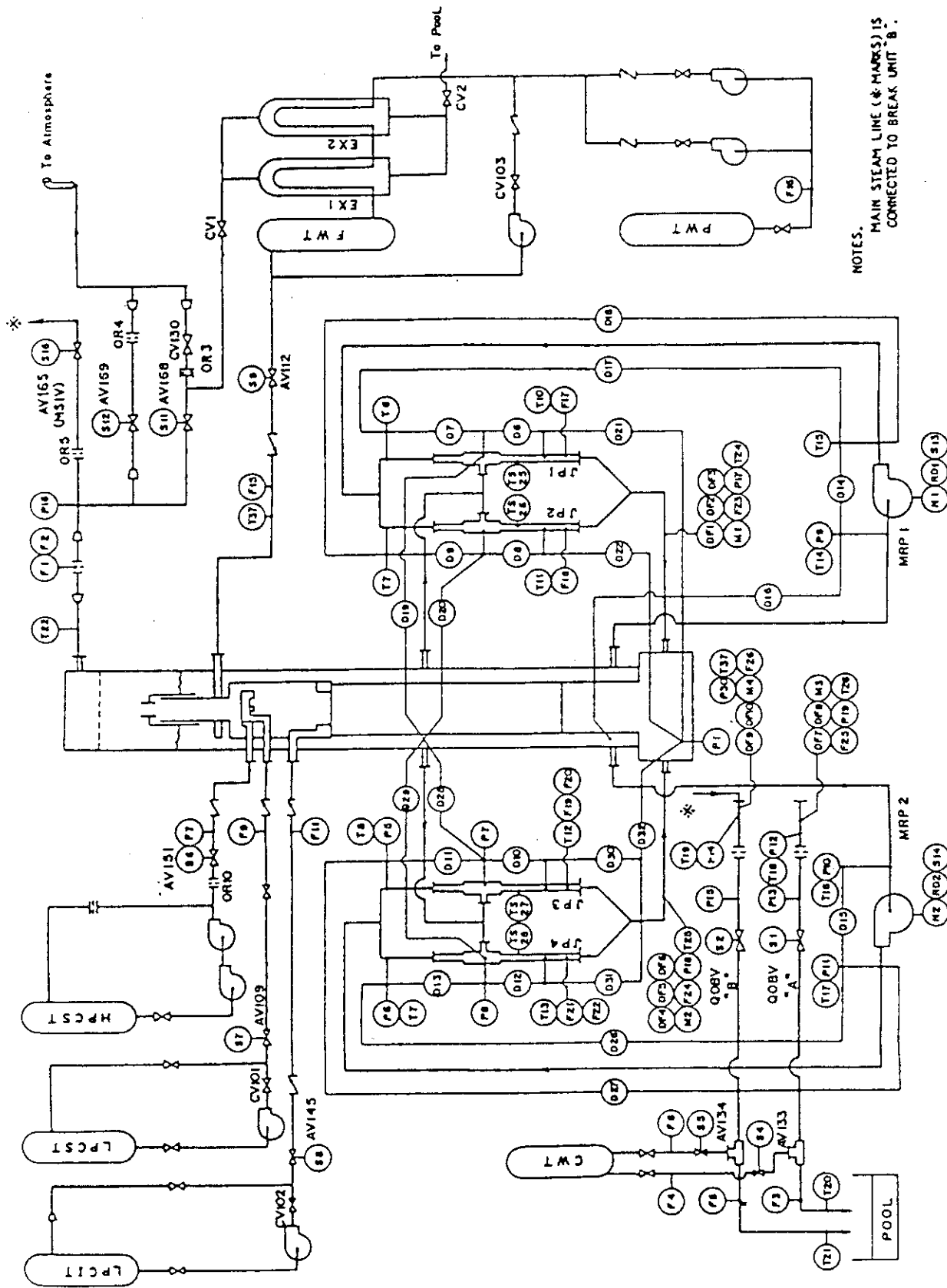


Fig. 2.9 Flow diagram and instrumentation of the ROSA-III facility

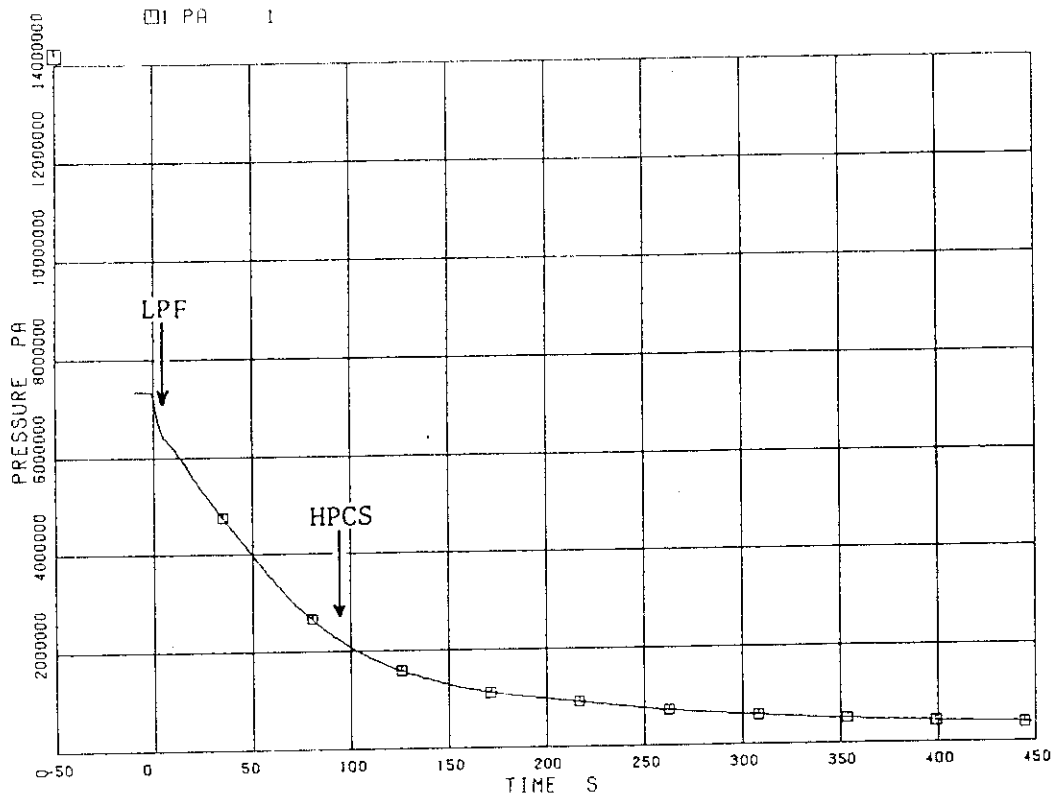


Fig. 2.10 Experiment result (pressure in lower plenum)

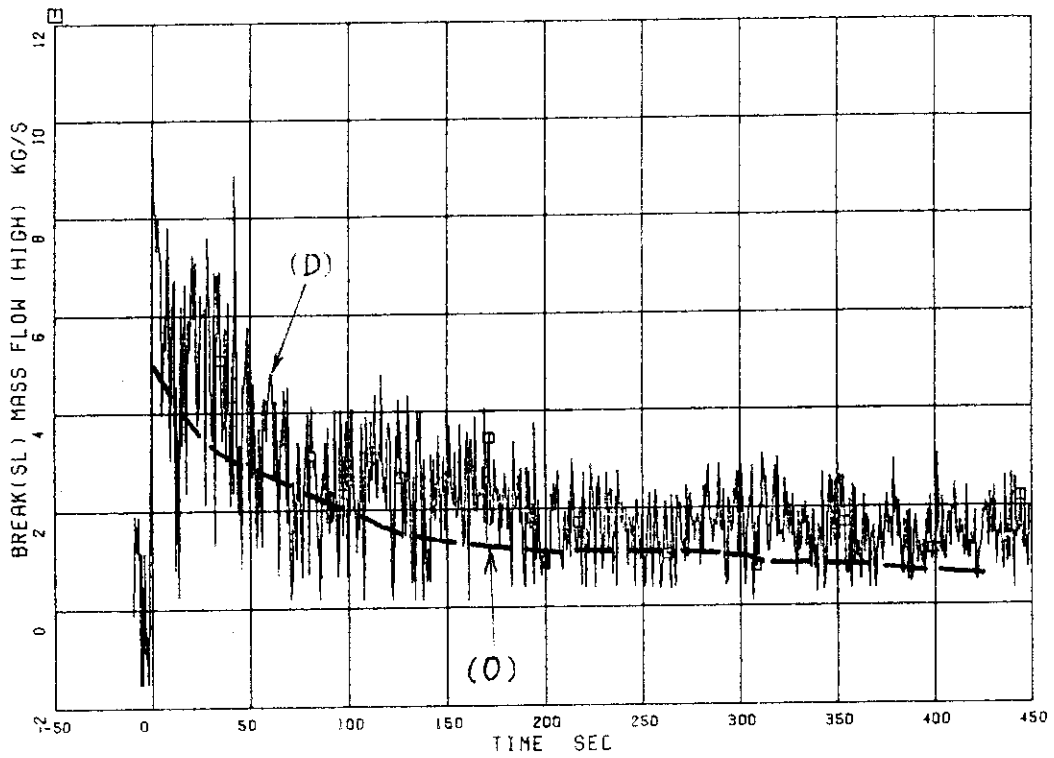


Fig. 2.11 Experiment result (discharged flow rates measured by orifice-type flow meter (O) and drag-disk flow meter (D))

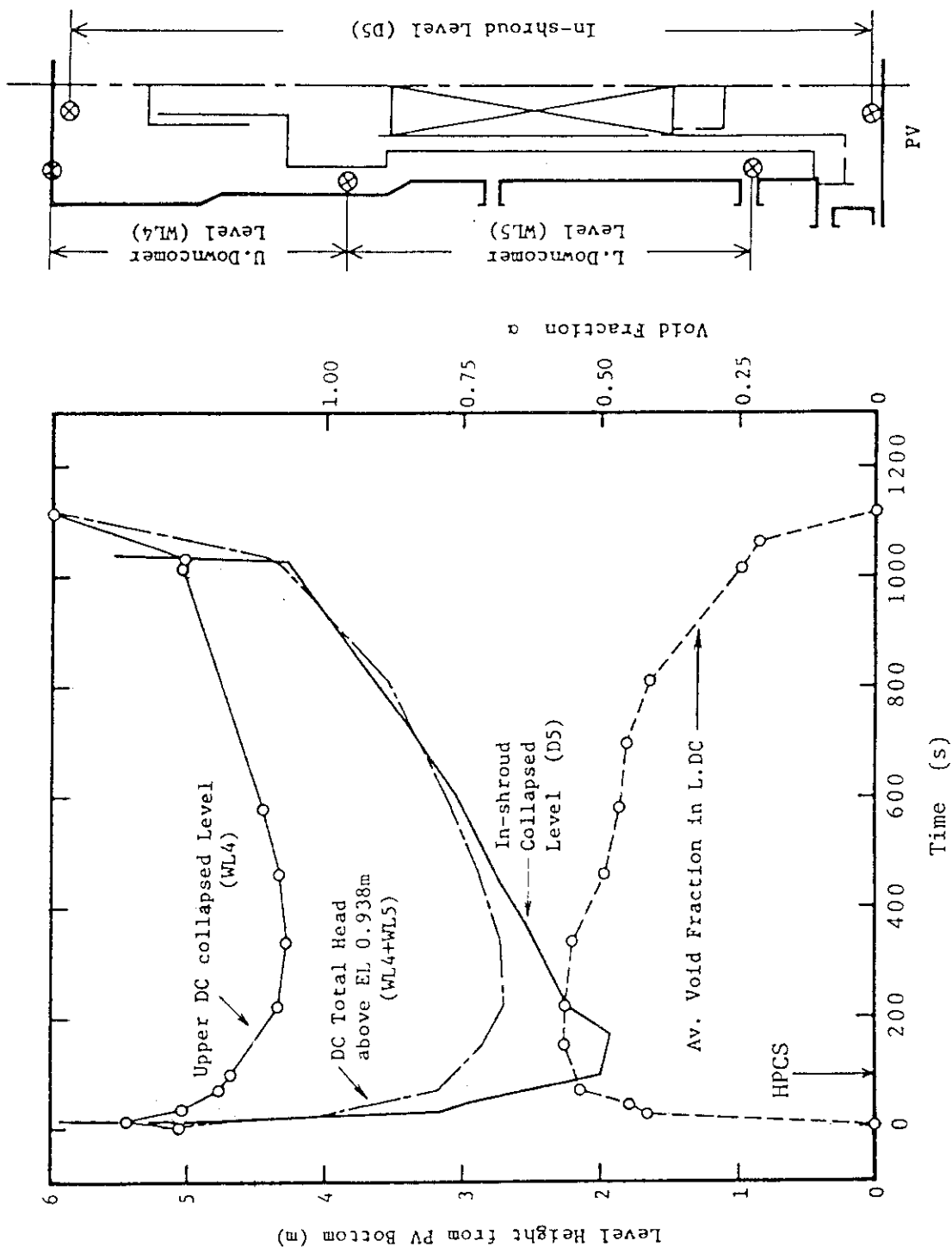


Fig. 2.12 Experiment result (collapsed water levels in the pressure vessel estimated from differential pressure data)

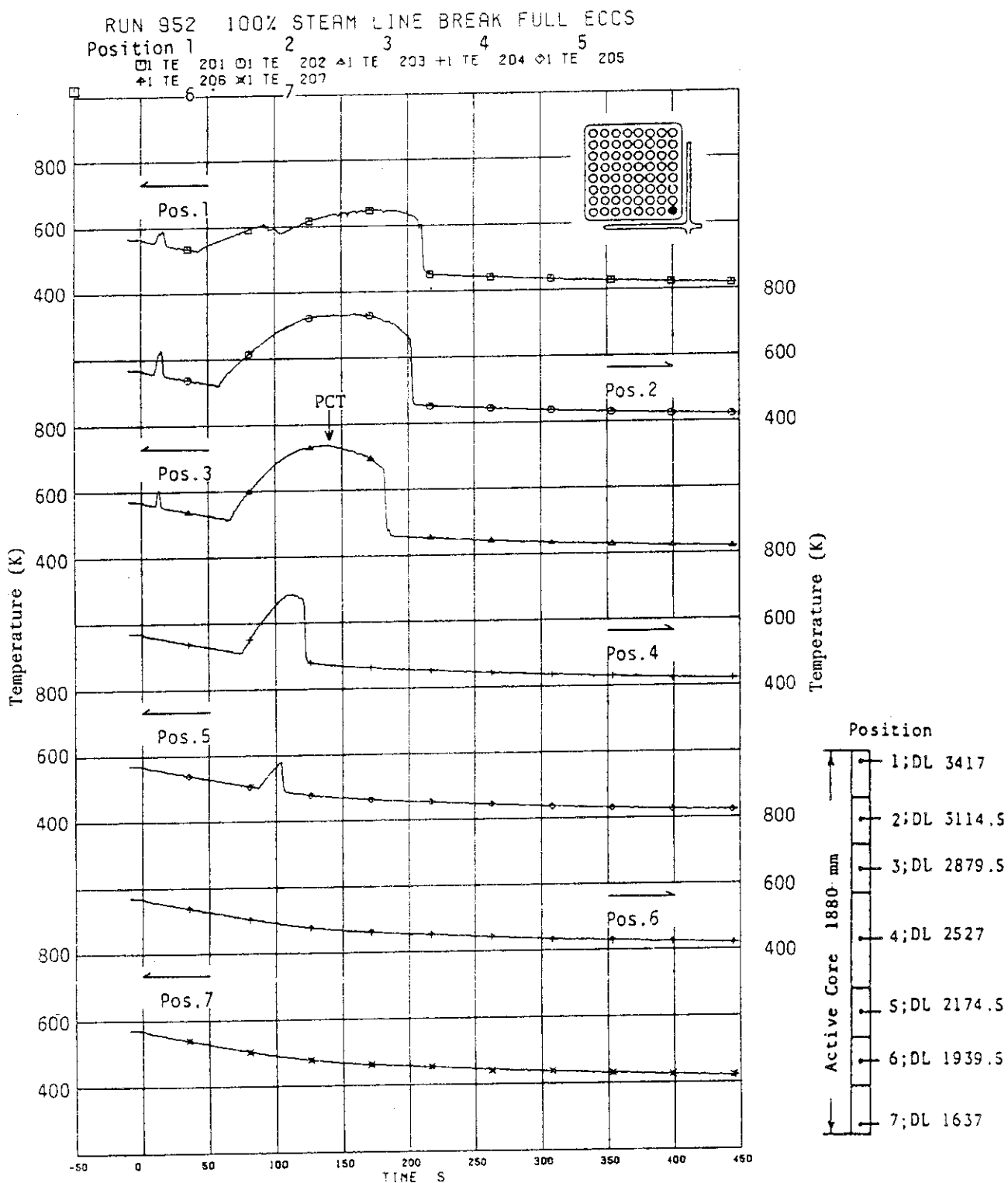


Fig. 2.13 Experiment result (fuel rod surface temperatures of All rod)

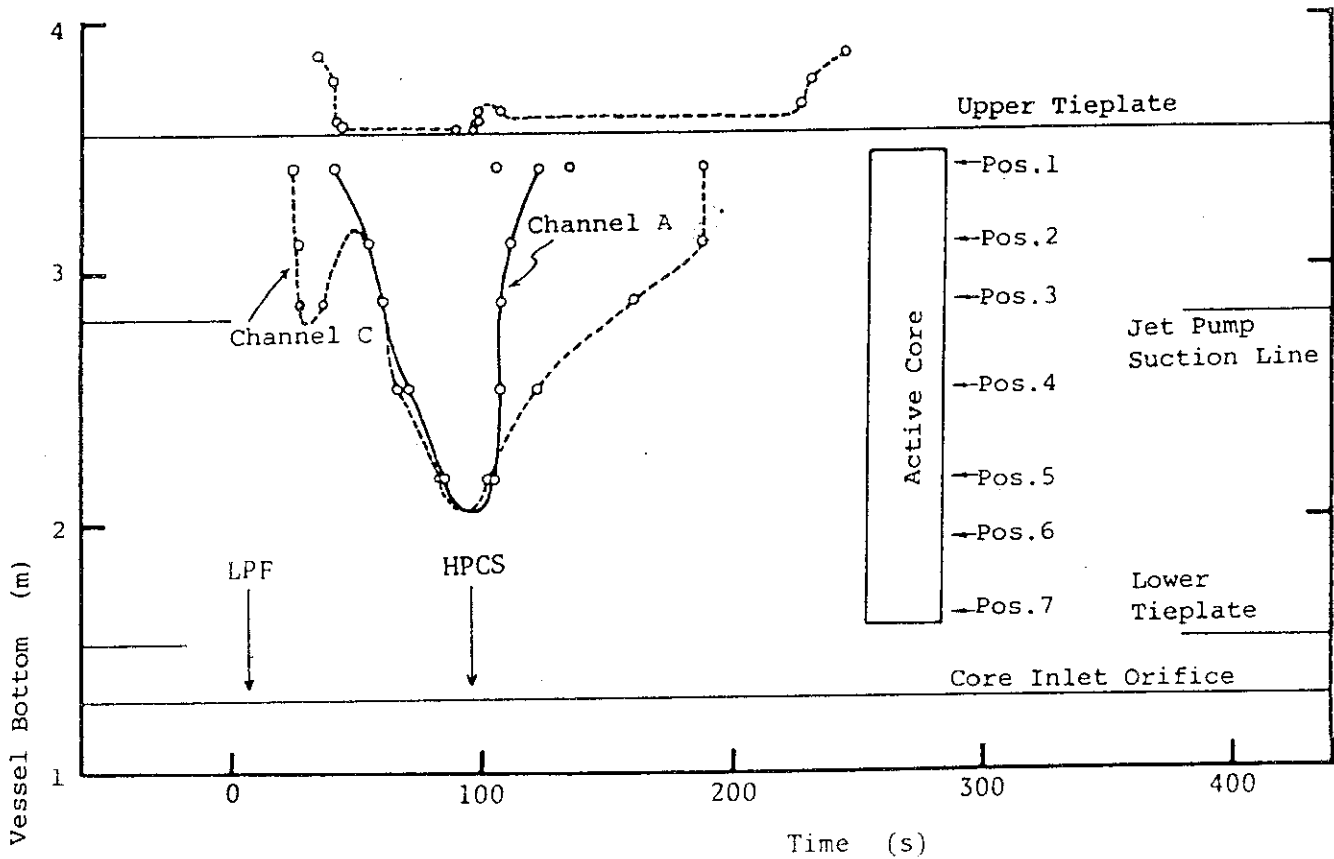


Fig. 2.14(a) Experiment result (mixture levels in core)

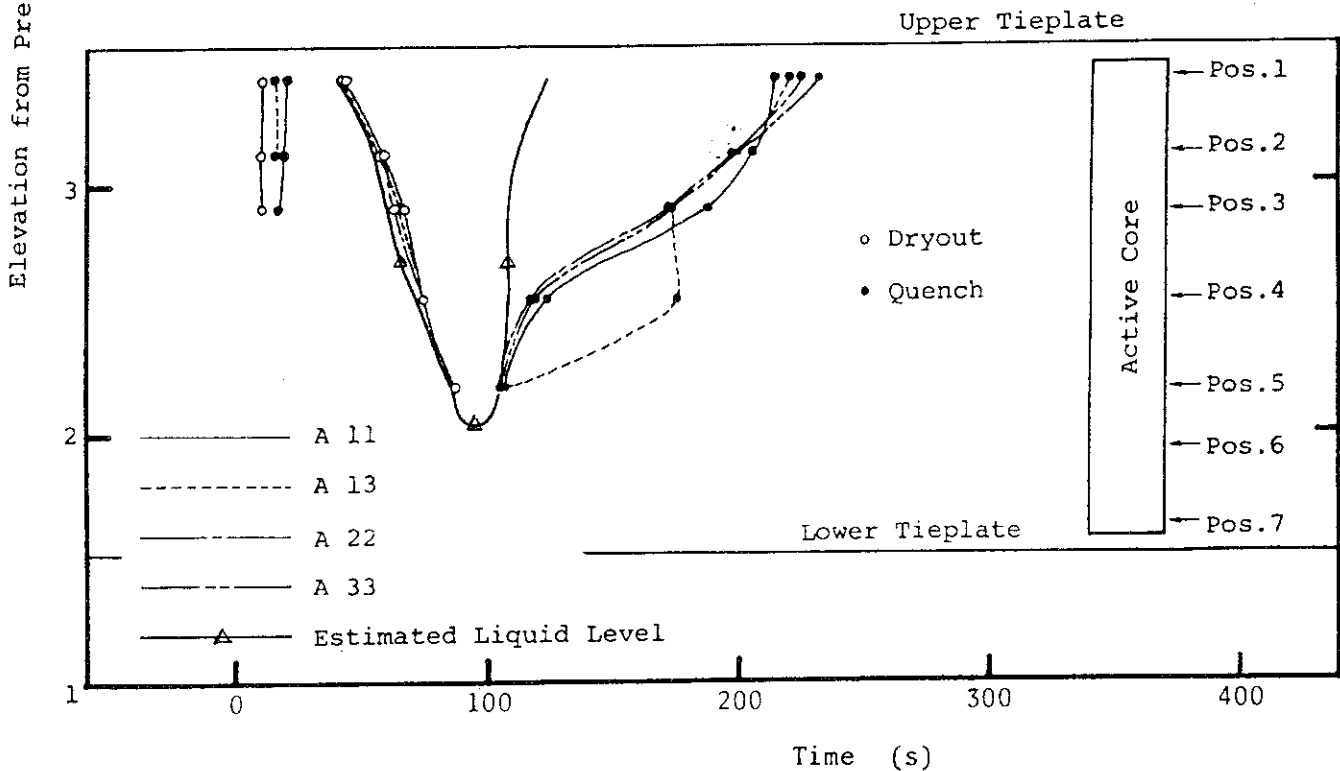


Fig. 2.14(b) Experiment result (dryout and quench behaviors in high power channel (A) related with liquid level)

3. 解析モデル及び解析条件

本章では、まず始めに、4章及び5章に記述する実験解析及び感度解析の位置づけと目的を3.1節に示し、3.2節では解析モデルと解析条件を示す。

3.1 実験解析及び感度解析

ROSA-Ⅲ装置における100%主蒸気管破断実験RUN 952の実験結果の基本的現象(2.2節参照)についてRELAP5/MOD1コードがどの程度計算できるのかを見るために、従来用いられていた安部らのインプット⁽¹²⁾を主蒸気管破断用に直して解析を行なった(基準ケース。以後ケースAと呼ぶ)ところ、解析結果は破断流量を実験結果よりかなり大きく評価するために、系圧力・残存水量等の系内の挙動が比較的早い時刻に実験結果と違ってしまって比較が困難になった。主蒸気管破断実験RUN 952の場合、系内から流出するのは主蒸気管からの破断流のみであるので、圧力容器内の熱流体挙動についてRELAP5/MOD1コードの解析結果と実験結果とのより詳細な比較・検討をするためには、まず第一に主蒸気管からの破断流量が一致していることが必要である。そこで破断口に放出係数を用い、気水分離器のモデル化を改良し、主蒸気管からの破断流量と系圧力が、実験結果と最も良く一致した場合(標準ケース、以後ケースSと呼ぶ)において、圧力容器内の各部の熱流体挙動の比較検討を行なった。これを実験解析と呼び、第4章にその内容を記す。

次に、主蒸気管破断口における放出係数の値が流出流量と系圧力に及ぼす効果を調べ(ケースD)、また主蒸気管破断事故時に生じる気液二相上昇流に対する気水分離器におけるセパレーターモデルについて調べ(ケースB)、ケースSの結果と比較し感度解析として第5章に結果をまとめた。なお、主蒸気管破断事故時に特徴的な挙動を示すダウンカマー水位については、圧力容器壁からの熱放出の影響も考えられるため、圧力容器壁のヒートスラブを除いた場合の解析(ケースH)とケースSとの比較を行い、合わせて感度解析の範囲に入れた。

Table 3.1にこれら5ケースの主な解析条件を示す。5ケースに共通しているのは、ボリューム分割や初期条件・過渡的条件等をROSA-Ⅲ装置とRUN 952の実験条件に合わせたことである。この共通条件については次節に詳しく示す。ケースSとケースAおよびケースDを比べることにより、主蒸気管破断における放出係数の影響がわかる。ケースSとケースBを比較することにより、セパレーターモデルとブランチモデルの影響がわかる。ケースSとケースHを比較することにより圧力容器壁からの熱的影響がわかる。

3.2 解析モデル及び入力データ

ROSA-Ⅲ実験RUN 952の実験条件はTable 2.3に示されている。RUN 952の解析条

件は、この実験条件と I S P -12*の予測解析に用いた安部らのデータ⁽¹³⁾を元にして作成したものである。また、R O S A -Ⅲ実験装置の形状に関する入力データは文献(3)を参考にした。以下に主な解析モデル及び入力データについて述べる。なお、本解析に用いた R E L A P 5 / M O D 1 / C Y C L E 1 コード（以下、特にことわらなければ R E L A P 5 / M O D 1 コードと呼ぶ）に対する入力データ（ケース S）を Appendix に示す。

(1) ノード分割

R E L A P 5 / M O D 1 コードで用いたボリューム、ジャンクション、ヒートスラブの分割方法を Fig. 3. 1 および Table 3. 2 に示す。R O S A -Ⅲ実験装置はパイプ、ブランチなどのコンポーネントでモデル化され、ボリューム数は70、ジャンクション数は77、ヒートスラブ数は40である。

炉心部は、高出力1チャンネル、平均出力3チャンネルをそれぞれ1つのパイプで表わし、ヒーター表面に設置されている熱電対の位置に合わせてそれぞれを軸方向7ボリュームに分割した。そして高出力チャンネルには、最高出力（局所ピーキングファクター（L,P,F）が1.1）の燃料棒を表わすヒートスラブとその他の燃料棒を表わすヒートスラブとを設置し、平均出力の3チャンネルについては1種類のヒートスラブを設置した。また他に圧力容器壁を模擬したヒートスラブを設け、圧力容器構造材の熱的効果を考慮した。ケースHではこの圧力容器壁を模擬したヒートスラブを除外した。

R U N 952はR O S A -Ⅲの第4次燃料を用いた実験であり、その炉心内の熱水力挙動に大きく影響する各部の流路面積を Table 3. 3 に示す。

(2) 初期条件

各ボリュームの圧力および温度などの初期流体条件は実験条件に基づき決定した。初期蒸気ドーム圧力は7.35MPa、下部プレナム温度は551.7 K、炉心電気出力は3.962 MWである。R E L A P 5 / M O D 1 コードにおける各ボリュームの初期圧力および温度分布を Table 3. 4 に示す。

各ジャンクションの初期流量も実験条件に基づき決定した。炉心バイパス流量は全炉心流量の5%と仮定し、これをもとに炉心の高出力チャンネル、平均出力チャンネルの流量を1:3に比例配分した。これらの流量の定常性は計算によって確認されている。各ジャンクションの初期流量分布を Fig. 3. 2 に示す。

(3) 臨界流モデル

R U N 952は主蒸気配管の100%破断を模擬した実験であり、破断面積は $7.548 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ である。臨界流モデルはR E L A P 5 / M O D 1 コードではR E L A P 4 コードと異なり臨界流量を圧力およびエンタルピのテーブルとして与えていない。R E L A P 5 / M O D 1 コードの臨界流モデルはRansom & Trappモデルを用いており、このモデルはChoking基準が圧力波の上流側への伝播の生じなくなる条件として与えられる特性法（固有値理論）に基づいている。

R E L A P 5 / M O D 1 コードでは放出係数のような修正係数は必要ないわけであるが、実際に実験データに最もよく合う条件を見出すためには適当な放出係数を求めることが必要とな

* I S P -12; OECD/NEAのCSNIが主催したLOCA解析コードの性能評価を目的とした国際的なベンチマーク問題の12番目にR O S A -Ⅲ小破断実験R U N 912が選ばれた（1982年）

る。放出係数は、対象とする流量に対して一律に適用されるので、破断面積が縮小する事と同等の意味を持つ。この場合、放出係数は臨界流モデルが妥当でないことを前提として使用するものである。ケースSの場合には放出係数 = 0.5 を採り、ケースDではこの値に 0.6 を用いた。放出係数の影響については、ケースDおよび 1.0 を用いた場合（ケースA）、すなわち RELAP5 / MOD1 コードの臨界流モデルをそのまま使用した場合の結果を合わせて5章に示す。なお、この放出係数について、LOFT 実験解析でもそれぞれの実験条件に応じて適切な値を採用し最適計算を行なっていることを付記しておく。

(4) 炉心出力変化

ROSA-III 実験では計算により求めた実炉における冷却材への伝熱量を模擬し電気出力として与えている。RUN 952 における電気出力変化を Fig. 3.3 に示す。出力は破断後 9.0 秒までは一定であり、その後実機における冷却材への伝熱量変化にあわせて減少する。

RWN 952 における炉心のバンドル間、軸方向、局所ピーキングファクターは各々 1.4, 1.4, 1.1 である。バンドル間ピーキングファクター；1.4 は高出力チャンネル A（ボリューム番号；C 45）の燃料棒に与え、平均出力 3 チャンネル；B, C, D（1 つにまとめてボリューム番号；C 40）の燃料棒には 1.0 を与え実験条件を模擬した。軸方向の出力分布は高出力チャンネル、平均出力チャンネルを各々軸方向 7 ボリュームに分割し、各ボリュームのヒートスラブに出力分布を考えることにより模擬した。局所ピーキングファクターは高出力チャンネルについてのみ考慮し、局所ピーキングファクターが 1.1 を表わすヒートスラブと残りの出力を表わすヒートスラブとに分けた。

(5) 給水および主蒸気系

給水温度は 489 K である。RUN 952 では給水流量は破断後 1.3 秒間持続し、その後減少して 3.2 秒で零となる。給水流量の変化は time dependent junction（以下 TMDPJUN と示す）で模擬した。なお、ROSA-III 装置の給水系統は実炉と同様圧力容器に対して開放されており、系内圧力が低下し給水温度の飽和圧力に達するとフラッシングしダウンカマーに二相流が流入する。これは系圧力の低下を抑制する作用を持つ。本解析ではこの影響も模擬するため、破断直後の給水流量模擬の系統（TMDPJUN；C 320 と time dependent volume（以下 TMDPVOL と示す）；C 310）とは別に、給水系フラッシングを模擬する系統（single volume；C 400 と junction；C 111③）を設けた。

主蒸気流量は RUN 952 の場合、定常時で 2.06 kg/s である。破断と同時に主蒸気系は定常ラインから破断ラインへ切り替る。定常ラインは TMDPJUN で模擬され、破断直後に流量が零になる。また破断ラインは主蒸気管を模擬した pipe；C 500 と破断オリフィス（31.0 mm I.D., 破断面積 = $7.548 \times 10^{-4} \text{m}^2$ ）を模擬した valve；C 510 で表わされる。破断流はその後外気を表わす非常に大きな TMDPVOL；C 540 に流入する。RUN 952 の場合、実炉で主蒸気隔離弁（MSIV）は破断と同時に作動し閉鎖したという状態を模擬しており、また自動減圧系（ADS）は作動していないので、本解析ではこれらに関するボリューム、ロジック等はない。

(6) ECCS

RUN 952 では HPCS のみが注入されているので、これを TMDPJUN；C 370 と TM

DPVOL : C 333で模擬した。注入流量は実験データより求めた。HPCSは破断後94秒に注入を開始する。

(7) 再循環ポンプ特性

主蒸気管破断実験の場合には、再循環ループのポンプは破断と同時にトリップし、以後数秒間で回転を停止する。したがって、このポンプ特性が大きな影響を持つのは破断直後の数秒間であり、ポンプはダウンカマの冷却水を炉心にする役割を持つ。この数秒間にポンプを流れる流体は水単相流である。単相流ヘッド特性およびトルク特性、摩擦トルク特性についてはROSA-IIIのポンプ特性試験のデータを用いた。ヘッドおよびトルク特性をFig.3.4, 3.5に示す。

(8) 水位計算モデル

RELAP5/MOD1コードではRELAP4コードと異なりボリューム内の水位計算が行なわれない。そこで上部ダウンカマ水位をボイド率とボリュームの高さを用いて求めた。すなわち、

$$\text{上部ダウンカマ水位} = \sum_i \{ (\text{ボリューム高さ}) \times (1 - \text{ボイド率}) \}_i$$

より求めた。ただし、 i は上部ダウンカマと蒸気ドームのボリュームについてとる。

(9) セパレーターモデル

気水分離器(C61)にはseparatrコンポーネントを用いた。これはRELAP5/MOD1コードに採用されたbranchコンポーネントの一種であり、branchとの唯一の違いは気水分離器の蒸気出口を表わすジャンクションはこのコンポーネントが完全に液に浸っていない限り、蒸気だけを通すという点である。このモデルは蒸気の100%分離を仮定している点で初歩的なものであるが、全てのジャンクションには逆流も許されるし、蒸気が液相とともにダウンカマに流れ込むことも許されている。また、このモデルを採用することにより、上部プレナムから流入するジャンクションに加えて、セパレーターと蒸気ドーム、およびセパレーターとダウンカマを結ぶ2つのジャンクションを設けることができ、流れの流路が実際のROSA-III装置のセパレーターに近いものとするができる。従来の再循環ループ破断の解析では、このセパレーターの流路として、上部プレナムとセパレーター、セパレーターと蒸気ドームの2つの流路を設けていたが、蒸気ライン破断解析の場合には上部プレナムから上昇してきた二相流が蒸気ドームを経て流出するためこれでは不十分であり、セパレーターにおける気水分離効果を考慮しなければならない。なお、上述のようにRELAP5/MOD1コードのセパレーターモデルに制約があり、この点については5章に示す、同じ3つの流路を持ち、separatrコンポーネントの代わりにbranchコンポーネントを使用したケースBと標準解析ケースSとの比較において述べる。

(10) ジェットポンプモデル

ジェットポンプにおける吸込流と駆動流の運動量の混合モデルは重要であるが、RELAP5/MOD1コードのジェットポンプでの運動量の混合モデルは不完全である。このため、ジェットポンプの吸込流が計算開始後瞬時に逆流し定常状態を維持できない。そこで、ジェットポンプ吸込部に吸込側配管容積をもつ小さなポンプを設けてジェットポンプでの流れを模擬した。このポンプのヘッド、トルク等の特性データとしては再循環ポンプのデータを使用した。

ジェットポンプ吸込部に設置した仮想的なポンプは破断と同時にトリップするが、破断後短時間のジェットポンプまわりの流量、および炉心入口流量に影響すると考えられる。しかしこの点については別の機会に検討することにし、本報では触れない。

(1) 熱損失モデル

ROSA-III実験装置の定常時における熱損失⁽¹⁴⁾は約150 KWである。RUN 952のような主蒸気管大破断実験では破断後の時間的变化が速く、しかもそれが炉心熱出力が比較的大きいときに起きるので、熱損失の影響は小破断実験の場合ほど大きくないと考えられる。しかし、圧力容器構造材の蓄積熱放出は破断後時間がたつにつれ大きくなり、圧力容器内流体に及ぼす影響も無視できなくなると考えられる。本解析では圧力容器壁ヒートスラブ(C1100～C1160)の二次側を大気(C900)に接することにより、このモデル化を行なった。

Table 3.1 Analysis conditions for each case

	ケースS	ケースD	ケースB	ケースH	ケースA
ボリューム数	70	70	70	70	70
初期圧力 温度	Table 3.4 参照	ケースSと同じ	ケースSと同じ	ケースSと同じ	ケースSと同じ
放出係数	0.5	0.6	0.5	0.5	1.0
気水分離器 のコンポー ネント	セパレーター モデル	セパレーター モデル	ブランチ・ モデル	セパレーター モデル	パイプモデル
ヒート スラブ数	40	40	40	21 (炉心部のヒート スラブのみ)	40

Table 3.2 Description of nodalized components for RELAP5/MOD1 code
(Case S)

Component Number	Component Type	Volume Number	Number of Junctions	Description
010	Branch	1	3	Lower Plenum below Tie Grid
011	Branch	1	2	Lower Plenum below Tie Grid
020	Single Volume	1	0	Lower Plenum below Tie Grid
030	Branch	1	4	Core Inlet Chamber
040	Pipe	7	6	Average Power Channel
045	Pipe	7	6	High Power Channel
050	Branch	1	4	Upper Plenum
060	Single Volume	1	0	Steam Separator
061	Single Volume	1	3	Steam Separator
062	Single Volume	1	0	Steam Separator
070	Branch	1	3	Upper Head
071	Single Volume	1	0	Upper Downcomer
072	Single Volume	—	1	
080	Single Volume	1	0	Steam Dome
090	Single Volume	1	0	Guide Tube
095	Single Volume	—	1	Flow Path from G.T.to C.B
100	Single Volume	1	0	Core Bypass
110	Single Volume	1	0	Upper Downcomer
111	Branch	1	3	Upper Downcomer(Feed Water)
112	Pipe	3	2	Lower Downcomer
120	Branch	1	4	Lower Downcomer(J.P.Suction)
130	Single Volume	1	0	Lower Downcomer
131	Branch	1	4	Lower Downcomer(R.C.Inlet)
132	Single Volume	1	0	Lower Downcomer
140	Single Volume	1	0	Intact Loop Recirc. Pump Suction
150	Pump	1	2	Intact Loop Recirc. Pump

Table 3.2 (Cont'd)

Component Number	Component Type	Volume Number	Number of Junctions	Description
160	Pipe	4	3	Intact Loop Recirc. Pump Discharge
170	Single Volume	1	0	Intact Loop J.P. Suction
171	Pump	1	2	Intact Loop J.P. Suction Pump
180	Branch	1	2	Intact Loop J.P.
185	Pipe	2	1	Intact Loop J.P. Discharge
200	Pipe	5	4	Broken Loop Recirc. Pump Suction
210	Pump	1	2	Broken Loop Recirc. Pump
220	Pipe	4	3	Broken Loop Recirc. Pump Discharge
230	Single Volume	1	0	Broken Loop J.P. Suction
231	Pump	1	2	Broken Loop J.P. Suction Pump
240	Branch	1	2	Broken Loop J.P.
245	Pipe	2	1	Broken Loop J.P. Discharge
291	Time Dependent V.	1	0	Main Steam Reservoir (Steady St.)
300	Single Junction	—	1	
301	Time Dependent J.	—	1	Main Steam (Steady St.)
310	Time Dependent V.	1	0	Feedwater Reservoir
320	Time Dependent J.	—	1	Feedwater
333	Time Dependent V.	1	0	HPCS Reservoir
370	Time Dependent J.	—	1	HPCS
400	Single Volume	1	0	Feedwater Line Piping
500	Pipe	2	1	Main Steam Line
510	Valve	—	1	Break Orifice
540	Time Dependent V.	1	0	Containment
900	Time Dependent V.	1	0	Heat Sink for Heat Loss
910	Valve	—	1	

Table 3.2 (Cont'd)

Heat Structure Comp. Number	Right Component Number	Number of Heat Structures	Description
001	040	7	Average Power Channel Heater Rods
002	045	7	High Power Channel Heater Rods (L.P. F = 1.1)
003	045	7	High Power Channel Heater Rods (L.P. F = 1.0 and 0.875)
100	080	1	Vessel Wall
110	080	1	Vessel Wall
	070	1	
	071	1	
120	110	1	Vessel Wall
130	111	1	Vessel Wall
	112	2	
140	112	1	Vessel Wall
	120	1	
	130	4	
	131	1	
	132	1	
150	010	1	Vessel Wall
	011	1	
160	011	1	Vessel Wall

Table 3.3 Flow area of No.4 ROSA-III simulated fuel assembly

Flow Area	m ²
Upper Tie Plate	31.64x10 ⁻⁴ /ch
Lower Tie Plate	31.66x10 ⁻⁴ /ch
Channel	97.85x10 ⁻⁴ /ch
Core Inlet Orifice (SEO)	15.205x10 ⁻⁴ /ch
	(44.0 mmφx1 /ch)
Leak Holes	1.312x10 ⁻⁴ /ch
	(9.14 mmφx2 /ch)
Guide Tube Holes	0.439x10 ⁻⁴ /ch
	(7.48 mmφx1 /ch)

Table 3.4 Input data of initial pressure and temperature in each component

	Pressure P (MPa)	Temperature T (K)	Quality X	Volume Number
Lower plenum	7.441	556.4	—	010
"	7.443	556.4	—	011
"	7.434	556.4	—	020
Core inlet chamber	7.427	556.4	—	030
Average Power Channel	7.423	557.7	—	040 (1)
"	7.419	560.2	—	(2)
"	7.414	—	0.0157	(3)
"	7.408	—	0.0547	(4)
"	7.402	—	0.0941	(5)
"	7.397	—	0.1147	(6)
"	7.391	—	0.1282	(7)
High Power Channel	7.423	558.4	—	045 (1)
"	7.419	—	0.0031	(2)
"	7.413	—	0.0330	(3)
"	7.408	—	0.0895	(4)
"	7.402	—	0.1460	(5)
"	7.396	—	0.1757	(6)
"	7.391	—	0.1953	(7)
Guide Tubs	7.433	556.4	—	090
Core Bypass	7.410	556.4	—	100
Upper Plenum	7.386	—	0.1408	050
Steam Separator	7.379	—	0.1408	060
"	7.371	—	0.1408	061
"	7.363	—	0.99999	062
Upper Head	7.351	—	0.99999	070
Steam Dome	7.350	—	0.99999	080
Upper Downcomer	7.352	—	0.99999	071
"	7.355	—	0.0	110
"	7.361	556.4	—	111

Table 3.4 (Cont'd)

	P (MPa)	T (K)	X	Volume Number
Lower Downcomer	7.366	556.4	—	112 (1)
"	7.371	556.4	—	(2)
"	7.376	556.4	—	(3)
"	7.381	556.4	—	120
"	7.394	556.4	—	130
"	7.407	556.4	—	131
"	7.410	556.4	—	132
Intact Recirculation Loop	7.479	556.4	—	140
"	7.819	556.4	—	150
"	8.141	556.4	—	160 (1)
"	8.111	556.4	—	(2)
"	8.037	556.4	—	(3)
"	7.992	556.4	—	(4)
Jet Pump Suction Line	7.351	556.4	—	170
"	7.506	556.4	—	171
Jet Pump Throat	7.497	556.4	—	180
Jet Pump Disch. Line	7.476	556.4	—	185 (1)
"	7.455	556.4	—	(2)
Broken Recirculation Loop	7.431	556.4	—	200 (1)
"	7.445	556.4	—	(2)
"	7.458	556.4	—	(3)
"	7.470	556.4	—	(4)
"	7.483	556.4	—	(5)
"	7.805	556.4	—	210
"	8.127	556.4	—	220 (1)
"	8.090	556.4	—	(2)
"	8.033	556.4	—	(3)
"	7.978	556.4	—	(4)
Jet Pump Suction Line	7.351	556.4	—	230
"	7.506	556.4	—	231
Jet Pump Throat	7.503	556.4	—	240
Jet Pump Dish. Line	7.483	556.4	—	245 (1)
"	7.455	556.4	—	(2)

- sp; separator
- sv, single volume
- sj; single junction
- p; pipe
- b; branch
- v; valve
- pu; pump
- tv; time dependent volume
- tj; time dependent junction
- ▨; heat structure

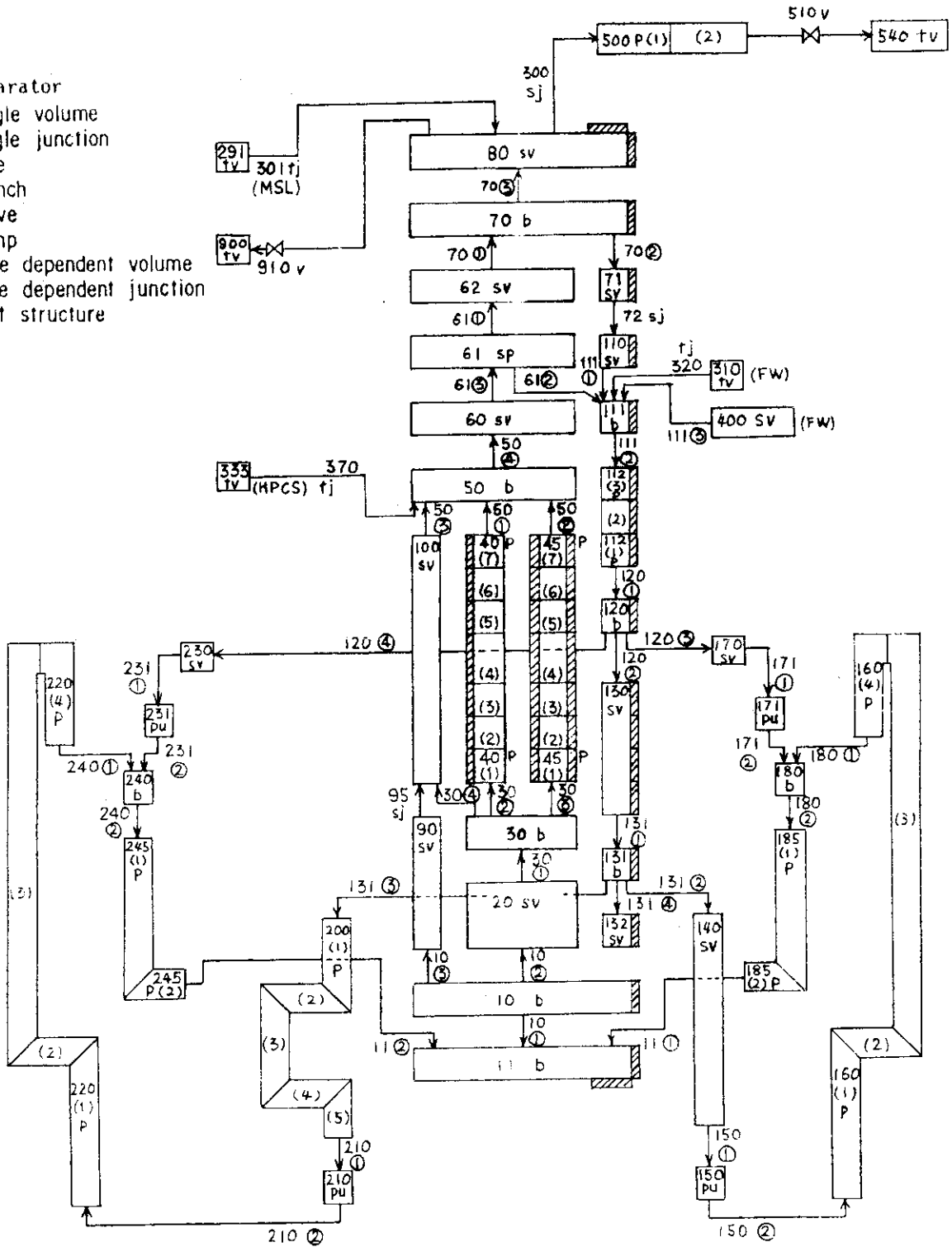
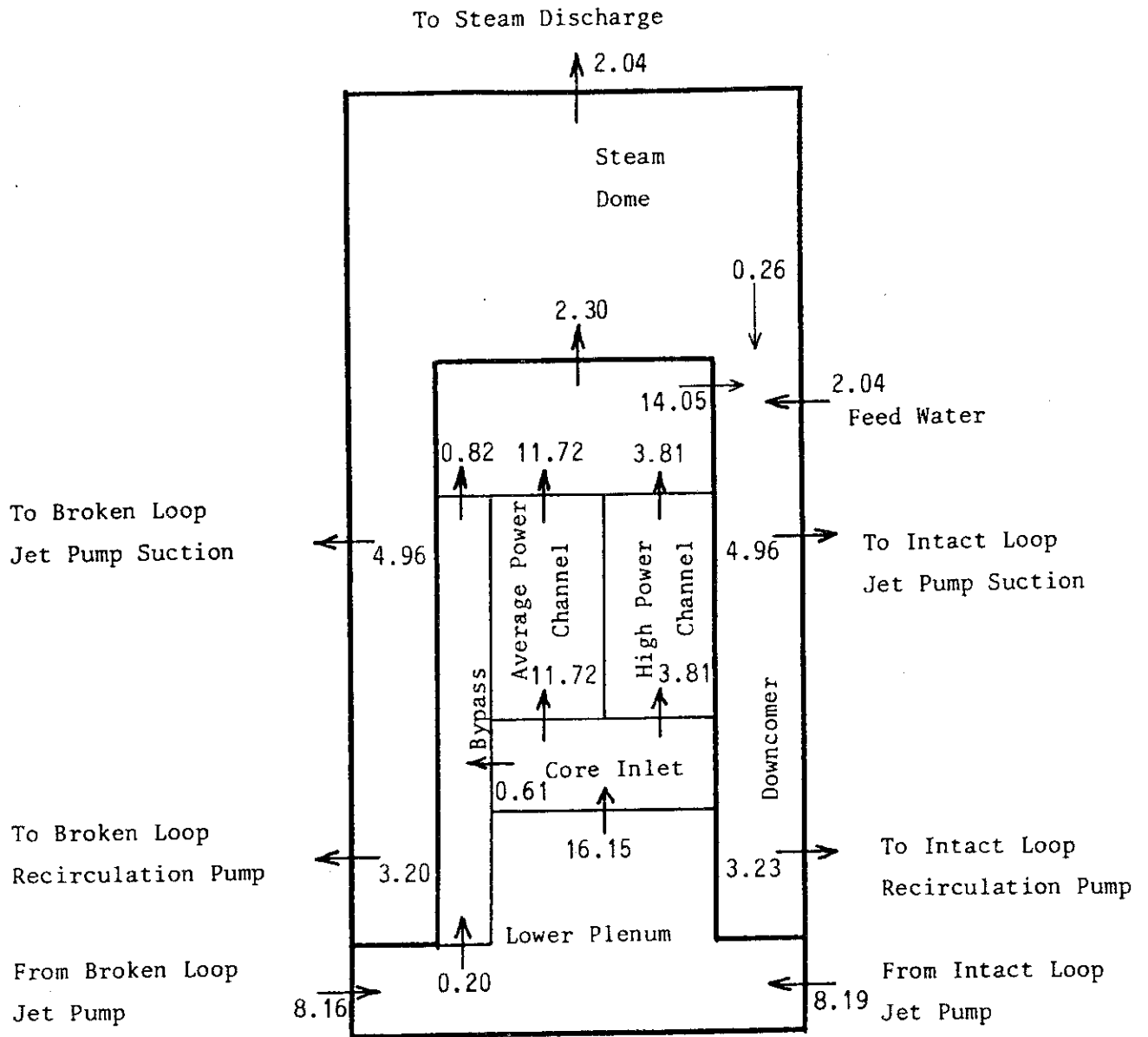


Fig. 3.1 Nodalization for ROSA-III analysis (Case S)



Note : Flow Rate in kg/s

Fig. 3.2 Input data of initial mass flow rates

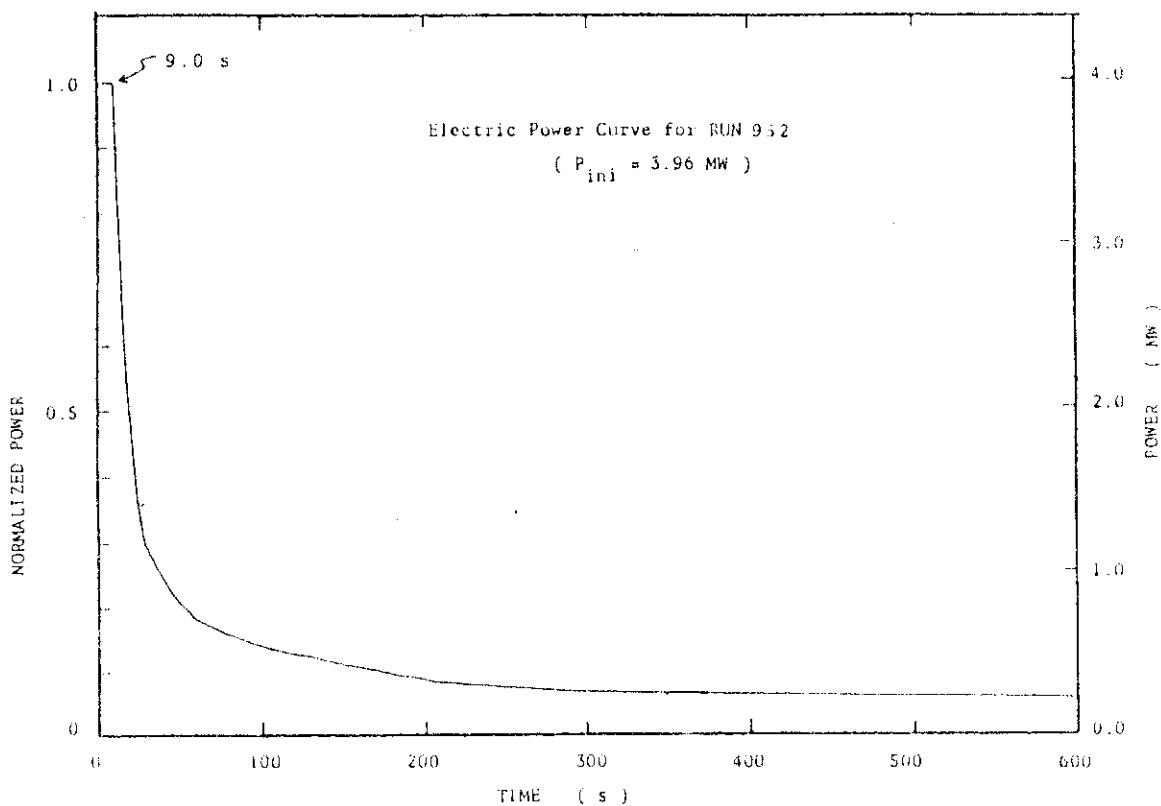


Fig. 3.3 Electric power curve for RUN952

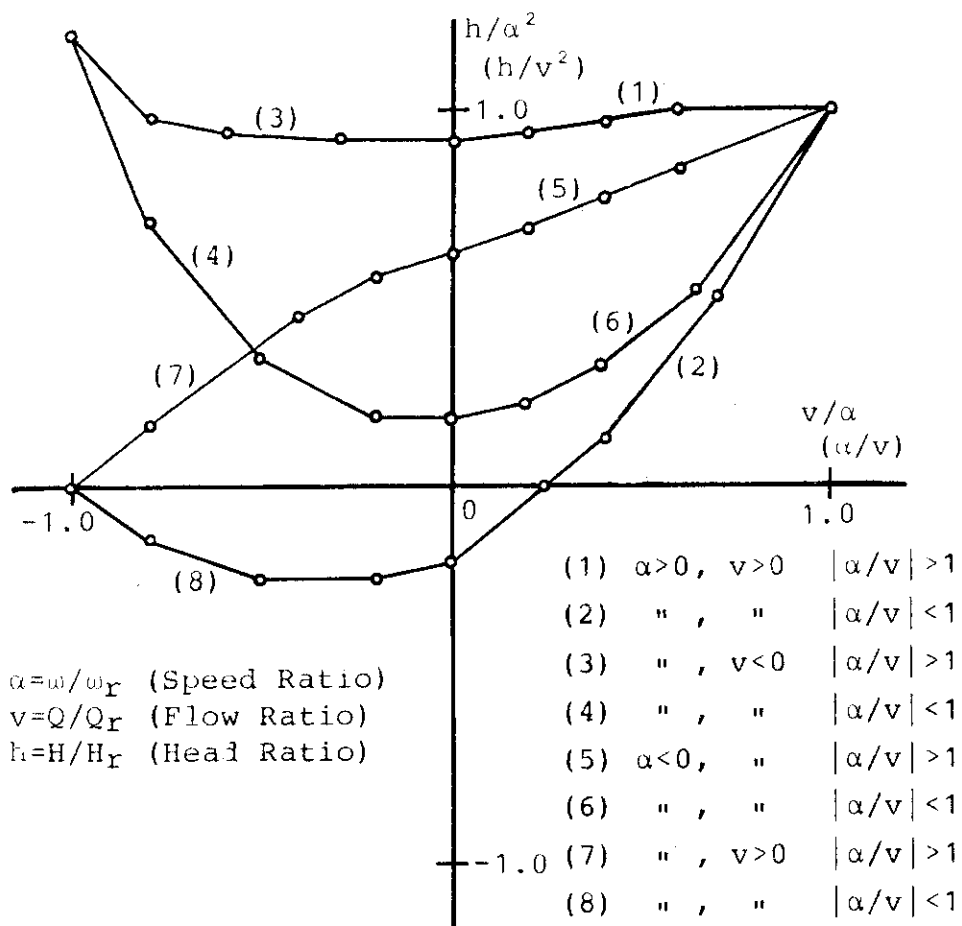


Fig. 3.4 Single-phase four quadrant head curves for the ROSA-III recirculation pump (MRP1)

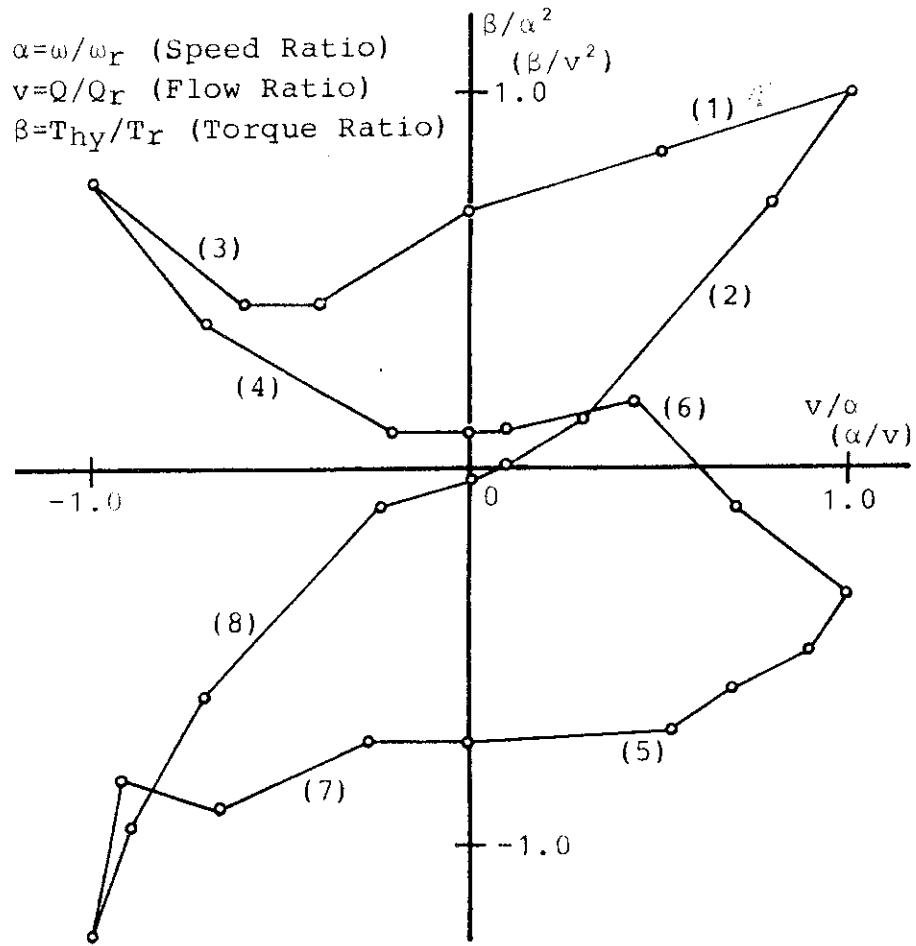


Fig. 3.5 Single-phase four quadrant torque curves for the ROSA-III recirculation pump (MRP1)

4. 実験解析の結果

RELAP5/MOD1コードの性能評価と、ROSA-Ⅲ主蒸気管100%破断実験(RUN 952)で見られた物理現象を解析コードにより確認することを本章の目的としている。対象とする物理現象は第2章(2.2節)に示した压力容器内の特徴的事象である。解析結果はケースSである。

以下に、主蒸気管破断実験における代表的な物理量である系圧力・主蒸気管破断流量・ダウンカマーとコアシュラウド内の差圧(残存水量)・水位・炉心の燃料温度挙動について実験結果とケースSの計算結果との比較を示す。また、実験結果は得られていないが、流量・クオリティ・ボイド率等の計算結果を参考に示す。なおケースSの計算は破断後242.0秒まで行ない、計算に要した計算機使用時間はFACOM M-200で約 10^5 秒であった。

4.1 炉内圧力変化

系全体の圧力挙動を代表して下部プレナム圧力の計算結果(ケースS)と実験結果とをFig. 4.1に示す。この計算結果は、他の解析ケースに比べて最もよく実験結果と一致した場合である。RUN 952は格納容器内側の主蒸気管100%破断を模擬しており、主蒸気隔離弁(MSIV)が破断と同時に閉鎖された後も蒸気流出が続くので、破断後系圧力はいずれも単調な減少を示す。この傾向は系全体で減圧沸騰が持続し、減圧が早いわりに残存水が系内に比較的多い主蒸気管破断の典型的圧力挙動である。Fig. 4.1を見ると(1)系全体のフラッシング開始による減圧速度の低下が実験では破断後4.2秒($P = 6.4$ MPa)に生じているが、ケースSではやや早く破断後3.3秒($P = 6.6$ MPa)に生じている(2)給水系フラッシング($P = 2.2$ MPa)とHPCS注入($t = 94$ 秒)の影響は、実験結果にも計算結果にも明確には現われていないことがわかる。計算結果は破断後60秒以降実験結果より約0.3 MPa低い値を示すが、全体として定性的には実験結果とよく一致している。このことにより、以下に示す炉内残存水量の変化、炉心の燃料温度挙動等について実験結果と計算結果の比較が可能となる。なお計算結果の系圧力が破断後31.7秒以降実験結果より早く減圧したのは、次節に示すように、主として流出クオリティが計算結果の方が高いことによると考えられる。これはセパレーターモデルに原因があると思われる。

4.2 主蒸気管の破断流量

主蒸気管破断流量の計算結果とを比較してFig. 4.2に示す。RUN 952における系からの流出流量はこの主蒸気管からの破断流量だけであり、系全体のエネルギーおよび質量バランスを考える上で重要な物理量である。実験値は2種類の測定法により求められたデータで、Fig. 2.11(2.2節参照)に示したものと同一である。オリフィス型流量計のデータ((O)と示す)は、

測定範囲の異なる2つの流量計のデータをつなぎ合わせたものである。一方、ドラグディスクとガンマー線密度計から求めた流量のデータ (D) と示す) は、常に $2 \sim 3 \text{ kg/s}$ の変動を示すため、一点鎖線でその平均値を示し、変動巾を付記した。また、実験上は得られていないが、ケース S の主蒸気ライン (C 500 (2)) のクオリティの結果を Fig. 4. 3 に示す。以下に、実験結果と比較した解析結果の特徴を示す。

ケース S の破断流量は破断直後を除いて実験値(O)よりも小さい値を示しているが、破断後 13.1, 19.4, 24.2, 28.7 秒にピークを示して実験値(O)よりも大きくなる。このピークは同時刻に現われる主蒸気管クオリティの谷に対応していて、これが低クオリティの流体の流出によるものであることがわかる。またこのピークは、実験値(D)が破断後 11.7 秒から増加する傾向と定性的に一致している。その後、計算結果は破断後 31.7 秒から実験値(O)よりも急な減少を示しながら単調に減少する。この傾向は定性的に実験値(O)と一致しており、実験値(D)のような脈動的な減少は示さない。

Fig. 4. 1 の系圧力と対応させてみる。ここで破断流のクオリティについて考えると、飽和蒸気は飽和水に比較して比体積が非常に大きいため、破断流の飽和蒸気の体積流量が系圧力の減圧速度を支配すること、逆に飽和水は飽和蒸気に比べ比重が非常に大きいために、飽和水の質量流量が破断質量流量を支配することがわかる。これから以下のことが言える (以後、ただ単に「流量」と言うときには質量流量を指すものとし、体積流量を指すときには特に「体積流量」とことわることにする)。

主蒸気管が破断すると系圧力は単調に減少してゆくが、系全体のフラッシングによって実験では破断後 4.2 秒に、計算では 3.3 秒に減圧速度が低下する。系全体がフラッシングを起こすまでは破断流は殆ど蒸気単相流なので、それまでの実験値(O)は信頼性があり、破断流量の比較はそのまま体積流量の比較として見ることができる。このときの破断流量の計算値は実験値(O)よりもやや小さい値を示す。

次に系内全流体がフラッシング開始した後は、破断後 11.5 秒から 31.7 秒まで計算結果の破断流量にスパイクが現われ、この計算値は、2種類の実験値(O)と(D)の中間的挙動を示す。計算結果と実験値(D)に見られるフラッシング開始後の重量流量の増加は、ともに蒸気単相流から二相流流出になり、クオリティが低下したことによるものである。94 秒以降、H P C S 水が上部プレナムに注入されているが、この H P C S 水の 1 部は蒸気ライン破断口から流出する。このことは実験値(D)に現われている。計算結果の方では 105 秒と 125 秒以後に示されている。

破断後から 250 秒までの時間帯について計算結果と実験結果とを比較すると、系圧力は前述のようにほぼ一致しているが、流出流量については、破断直後の蒸気流出過程と、フラッシング開始した後約 50 秒までの 40 秒間は実験結果に近い値を与えているものの、以後は計算結果の流出流量が小さくなっている。50 秒以後は計算結果が、流出質量流量が小さいにも拘わらず系圧力の低下速度が実験結果によく一致するということは、流出クオリティが実際以上に高く計算され、流出エネルギーが結果的に実験結果に近かったためと考えられる。なお、ドラグディスクと密度計による流量(D)は全体的にオリフィス計のデータ(O)よりも高い値を示しているが、これは破断前後の急激な温度差に対する計器の較正が不十分である可能性が強い。この点については別の機会に検討することにした。

次に Fig. 4. 3 の計算結果における主蒸気管のクオリティーを見ると、系内の流体のフラッシングによって破断後11.5秒から低クオリティーの流体が流出したこと、その後系内の残存水の減少、ボイド率の増加につれて流出流体のクオリティーも増加し、破断後60秒には蒸気流出になったことがわかる。94秒以後に注入されたHPC Sの影響は、105秒および125秒以後の主蒸気管内のクオリティーの減少に現われている。これはHPC S水が破断口から流出したため、この現象はRUN 952のコアシュラウド内の差圧増加率とECC S注入量をチェックした結果、実験でも起こっていることが確かめられている。

以上のことから、破断直後の蒸気流出、フラッシング開始による二相流出過程については、計算結果は実験データの傾向をよく表わしているといえることができる。

4. 3 ダウンカマーの水位とボイド率

Fig. 4. 4 に下部ダウンカマーでの差圧を示す。下部ダウンカマーの差圧は、破断と同時に再循環ポンプがトリップした後流動抵抗分が小さくなり、加速項も無視しうると考えられるので、ほぼ水頭分を示すようになる。下部ダウンカマー差圧は、下部ダウンカマーの残存水量および平均ボイド率 (Fig. 4. 6 参照) を表わす物理量として重要である。計算結果ではノーディングの関係で若干測定点が実験の場合と違っている (実験ではDL (圧力容器の底からの高さ) ; 939 mm - DL ; 3900 mm であるのに対し、計算ではDL ; 938 mm - DL ; 4054.5 mmである) が、位置の差による差圧の誤差は最大 1.5 kPa であり、破断前の状態で約 1.1 kPa である。この差を考慮すると、破断直後を除いて計算結果は実験値と破断後35秒まで比較的よく一致している。その後計算値は変動を示しながら徐々に減少してゆき、破断後94秒のHPC S注入後はゆるやかな増加を示し、定性的な傾向は実験結果と一致する。しかし、上記の差を考慮しても計算結果はつねに実験結果よりも大きい値を示し、残存水を多めに評価している。この原因として(1)破断後31.7秒以降主蒸気ラインからの破断流量を実験値より少なく計算していること(2)同時にセパレーターからダウンカマーへの流入流量が多いことの2点があげられる。

本解析では上部ダウンカマーにおける水位 (ここでいう水位は混合水位ではなく、ボイドをつぶしたcollapsed 水位を意味している。したがって混合水位はこのcollapsed 水位より上にあることになる) ; WL 4 を、上部ダウンカマーの各ボリュームのボイド率とボリューム長さをもとに次式で求めた。すなわち

$$\begin{aligned}
 WL 4 = & 0.35 \times [1 - VOIDG \{ C 112(3) \}] + 0.1634 \times [1 - VOIDG (C 111)] + \\
 & 0.73 \times [1 - VOIDG (C 110)] + 0.222 \times [1 - VOIDG (C 71)] + \\
 & 0.2817 \times [1 - VOIDG (C 70)] + 0.348 \times [1 - VOIDG (C 80)] + 3.90
 \end{aligned}$$

ただし、各項の係数は対応するボリュームの高さを示す。ここでその結果と実験結果を比較して Fig. 4. 5 に示す。実験結果は上部ダウンカマー差圧を密度補正して求めたものである。ただし解析ではノーディングの関係で初期水位が 5.14m となっているが、実験では 5.07m である。

実験では、破断直後にダウンカマー部の循環流量の減少によって圧力損失がなくなるため水位が約10cm上昇して値 (5.17m) を示しその後系圧力の減少によるダウンカマー部の流体のフラッシングによって再び水位が上昇する。一方計算結果では、水位信号は破断後4秒までいっ

たん減少した時、フラッシングによって上昇する。その上昇量 ($5.17 - 4.95 = 0.22\text{m}$) は実験結果 ($5.45 - 5.17 = 0.28\text{m}$) に近い値を示し、計算結果はフラッシングによる水位の上昇をよく計算している。

破断後40秒以降、計算結果は実験値と非常によい一致を示しているが、160秒からやや振動するようになる。これは上部ダウンカマのボリューム (C 110) のボイド率の変動を反映している。(Fig. 4.6)

ダウンカマ各部のボイド率の計算結果を Fig. 4.6 に示す。破線で示してあるのは下部ダウンカマ差圧の実験値から求めた平均ボイド率である。

ダウンカマでのボイド率の計算値は、セパレーターからの低クオリティーの流体が上から流れ込む効果とダウンカマ内で発生する蒸気の上昇、および再循環ループと下部プレナムからダウンカマに流入する二相流の効果により決定される。

上部ダウンカマではボイド率がすぐ下のボリュームよりも小さい時間範囲があるが、他の下部ダウンカマのボリュームでは上に行くほどボイド率は大きくなっている。一方、下部ダウンカマでの計算値と実験値を比較してみると、ボリューム ; C 112 (2), C 120, C 130 のボイド率は実験結果と比較的よく一致していることがわかる。

ダウンカマ部での初期水位はボリューム ; C 71 と C 110 の間にあるため、上部ダウンカマ ; C 71 のボイド率は最初 1.0 である。C 71 のボイド率は破断直後にいったん少し下がって再び上昇するが、ダウンカマ各部で起こるフラッシングのため、破断直後 4.0 秒からゼロ近くまで減少していく。破断後 11.7, 17.7, 23.5, 27.1 秒にボイド率の谷があるのは、下のボリュームから低クオリティーの流体がフラッシングによって通過するためである。この谷は 13.1, 19.4, 24.2, 28.7 秒に現われる破断流量の山 (Fig. 4.2) と主蒸気管 (C 500 (2)) のクオリティーの谷 (Fig. 4.3) に対応している。また破断後 29.2 秒から 54.6 秒まで C 111 のボイド率が急に増加しているのは、C 111 からセパレーターに逆流が生じて飽和水が C 111 から流出したことによるのがセパレーターと C 111 を結ぶジャンクション ; C 61 (2) の質量よりわかる (Fig. 5.13 参照)。その後 C 71, C 110 のボイド率は次第に増加していくが、それより下のエレベーションのダウンカマ部のボイド率はほぼ一定に保たれている。

以上、RELAP 5 / MOD 1 コードによって、ダウンカマのボイド率の推移および上部ダウンカマ水位のスエリング等の実験結果に示された挙動を基本的によく表わすことができた。

4.4 炉心の燃料表面温度と流体挙動

この節ではケース S の炉心部での熱水力的挙動を調べるため、まず最初にコアシュラウド内の差圧から残存量を調べダウンカマ水位との関係についても実験結果と比較する。次に炉心部のボイド率と流量から炉心内の概要を述べ、最後に燃料棒表面温度を示すことにする。また上部プレナムに注入された HPCS 水の挙動を見るために、炉心部・コアバイパス出口での蒸気流速とコアバイパス出口流量を併せて示す。

Fig. 4.7(a) に、炉心シュラウド内 (下部プレナムと蒸気ドームまで) の差圧の実験結果と計

算結果を示す。ノーディングの関係で計算結果は実験の場合と若干測定点が違っているが（実験値のDL：100 mm-DL：5910 mmに対し、計算ではDL：92.5 mm-DL：5821.1 mmである）、測定位置の違いによる誤差は最大数十Paであり、無視することができる。

実験値は破断前は約92 kPaで、破断直後に破断流による加速効果によっていったん増加した後、ポンプ・コストダウンによる流量減少のため減少する。しかし計算結果は破断後すぐに約55 kPaにまで減少してしまい、この加速効果を評価できていない。その後計算結果は激しく振動しながら減少し、下部プレナム・フラッシング（計算では破断後3.5秒で起こる。Fig. 4.18参照）のため増加した後、再び減少する。この傾向は定性的に実験結果と一致しているが、実験値の方が10 kPa程大きい。破断後12.9, 19.2, 23.7, 27.9秒に計算結果に現われる谷は、ほぼ同時刻に現われる炉心流量（後述Fig. 4.9参照）の谷に対応していて、この谷が炉心流量の減少によるものであることがわかる。破断後30秒から50秒まで計算結果は実験結果よりも大きい、それ以後は実験結果と比較的よく合っている。

HPCS注入後、実験結果は残存量の増加によって徐々に増加してゆくが、計算結果は（特に175秒以降）少しずつ減少して実験結果より小さくなってゆき、系の蓄水過程が正しく評価されていない。このことは、以下に示す炉心部のボイド率や燃料棒表面温度の傾向にも現われている。

次にFig. 4.7(b)に、実験結果及び解析結果の上部ダウンカマーとシュラウド内水位の比較を示す。これは差圧の値を静水頭のみと仮定した、水面下のボイド分をつぶしたcollapsed水位を示すものである。この図中の上部ダウンカマー水位の計算結果と実験結果はFig. 4.5に示したものと同一であるが、シュラウド内水位と比較するために示した。シュラウド内水位はFig. 4.7(a)に示した差圧に対応している。Fig. 4.7(b)より次のことがわかる。即ち、ケースSでは上部ダウンカマーのみでなく、シュラウド内水位も計算結果と実験結果は大体よく一致している。但し、再冠水過程では計算結果の方が蓄水を計算できていない。また、実験結果において見られた上部ダウンカマー水位よりシュラウド内水位がかなり低くなるという事も、ケースSではよく模擬されていることがわかる。このように圧力容器内において、ダウンカマー側と炉心側のインベントリの変化がかなりよく模擬できていることは重要な点である。

次に、Fig. 4.8に高出力チャンネルAを模擬しているボリューム（C45）の各ボリュームにおけるボイド率は、定常状態ではエレベーションが上である程大きくなっているが、破断直後にポジション1, 3, 5はすぐにボイド率が増加するが、破断直後のボイド率の減少が大きいポジション2, 4では増加するのが遅れる。そのため破断後55秒までのボイド率はエレベーションが上であるほど大きくなり、でこぼこしたものになる。しかし、ポジション1のボイド率が破断後50秒でほぼ1.0を示した後、各ポジションのボイド率は上から順に1.0を示すようになり、最後のポジション7では破断後180秒に1.0となる。これはそれぞれの位置が蒸気中にドライアウトした時刻を示すものである。その後各ポジションのボイド率は、ポジション6, 7が破断後200秒から210秒までいったん減少する以外は、つねに1.0となっている。

一方、コンダクション・プローブにより得られた実験結果からは、(1)ポジション1（破断後41秒）からポジション5（破断後85秒）までは上から順にドライアウトするが、ポジション6, 7はドライアウトしない(2)HPCS注入後、炉心混合水位は上昇を始め、破断後105秒にポジ

ション5を通過して下から順にクエンチが進行し、破断後123秒にはポジション1に水位が達することがわかる。コンダクション・プローブの実験データから求めた、各ポジションが蒸気中に露出した時間を破線のバーでFig.4.8に示す。

計算結果と実験結果とを比較すると、(1)HPCS注入開始時間までをみると、ポジション1～4のドライアウトする時刻は計算と実験とではほぼ一致しているが、ポジション5では計算結果の方がボイド率が低く、実験のようなドライアウトは起こらないこと(2)HPCS注入後、実験では混合水位の上昇によって下から順にボイド率が下がって行くが、計算ではHPCSによる蓄水効果が見られず、破断後175秒からはポジション5, 6, 7が次々にドライアウトし始めること(これは175秒から計算結果のチャンネルAの流量がゼロになることと対応している)がわかる(Fig.4.10～4.16参照)。このように、炉心内のボイド率の計算結果は実験における燃料棒のドライアウト挙動と大体よく対応しているといえる。

Fig.4.9に平均出力チャンネル; B～Dを模擬したりボリューム(C40)の各ジャンクションにおける流量の計算結果を示す。チャンネルAの炉心流量も同じ傾向である。

流量の全体的傾向は炉心内で共通である。すなわち、破断直後からポンプ・コストダウンによって各ジャンクションの流量は低下するが、計算では破断後3.5秒から起こる下部プレナム・フラッシングによって一時的に増加する。その後流量は減少してゆき破断後13.1, 19.4, 24.2, 28.7秒に流量の谷が現われるが、これは同時刻に現われる破断流量のピークと上部ダウンカマー; C71のボイド率の谷と一致している。つまり炉心の上昇流が弱まった時に上部ダウンカマーのボイド率が低下し、破断流量は増加した。以上の点から、計算結果の破断流量に現われたピークはダウンカマーの低クオリティの水が破断口から流出したため起こったことがわかる。破断後50秒を過ぎると、ボイド率が殆ど1.0になった炉心上部(C40(3)より上の部分)のジャンクションでの流量は、殆ど0に近くなり変動も小さくなる。しかし、それより下のジャンクションではまだかなり激しく変動している。HPCS注入後、C40(3)より下のジャンクションでの流量変動はさらに激しくなり、特に破断後150～175秒, 200～210秒での変動は顕著である。また、そのときの炉心上部のジャンクションでの流量はつねに上向きであり、HPCS水は上部プレナムから炉心部へ流下していかないことがわかる。これは次に示す実験結果の燃料棒表面温度から得られたHPCS水の挙動すなわち、HPCS水は炉心上端から流下して上方より燃料棒をクエンチしたのではなく、HPCS水はバイパス部を流下し炉心を下方から順にクエンチしたと一致しており、炉心上部のCCFL計算が妥当なことを示している。

Fig.4.10から4.16に、高出力チャンネル(C45)に付いているヒートスラブのうち、局所ピーキングファクター(L.P.F)が1.1の最高出力燃料棒を模擬したヒートスラブの表面温度を、対応するA11ロッドの表面温度の実験結果と各ポジションごとと比較して示す。

実験結果から、(1)炉心上部のヒーター表面温度は破断後しばらくして部分的に上昇するが、下部プレナム・フラッシングによりクエンチすること(2)その後水位レベルの下降による温度の再上昇が起こること(3)HPCS注入により下から順に上方にかけてクエンチすることがわかっている。これらの点は平均出力チャンネルでも全く同じである。すなわち、注入されたHPCS水はコアバイパス部を通り、バイパスホールを経て炉心に流入し、燃料棒を下からクエンチした。次にこれらの傾向と計算結果とを比較する。

A11ロードではポジション1～3で一時的な温度上昇が破断後10秒に起こった。計算結果では温度上昇が早く露出時間が長いものの、ポジション1と3では実験値と傾向がよく一致している。ポジション2で一時的な露出が計算されなかったのは、このボリュームのボイド率が低かったこと（Fig.4.8参照）が原因である。

フラッシング後の水位の下降による温度上昇の計算結果は、ポジション3より上で実験値とよく一致している。しかし、ポジション4と5ではボイド率が低いため温度上昇が小さく、実験結果とあまりよい一致を示していない。

HPCSが注入されると、実験では蓄水のためヒーターピン温度は下方から順に低下するが、解析では蓄水過程がうまく計算されないために175秒以降全ての点で温度が上昇し続ける。実験では温度上昇しなかったポジション6,7でも、計算結果では温度を上昇する。

平均チャンネルでの計算結果と実験結果の比較もチャンネルAでの結果とほぼ同じである。ただし、計算結果の平均チャンネルにおけるボイド率がチャンネルAに比べて小さいため、ドライアウト後の温度上昇が実験結果に比べてより低くなっている点、225秒以降に全てのポジションで温度上昇が起こる点が少し違っている。

ケースSの炉心出口では長時間にわたってCCFLが起こっておりHPCS水が炉心に流れ込まなかった（Fig.4.9参照）ことは既に述べたが、参考のためにFig.4.17に炉心およびコアバイパスそれぞれの出口における蒸気流速を示す。破断後50秒以降炉心出口の流れはほぼ蒸気単相になり（Fig.4.8参照）、そのときの蒸気流速は1～2 m/sである（コアバイパスでの蒸気流速は約0.8 m/sである）。HPCSが破断後94秒に注入されると炉心出口の蒸気流速は若干の増加を示す。その後この蒸気流速は1.2～3.4 m/sの範囲で振動しているが、高出力チャンネルでは175秒以降、平均出力チャンネルでは200秒以降減少してゆく。一方、コアバイパスの蒸気流速はHPCS注入後もそれほど大きな変化はなく、227秒までつねに正の値を示している。しかし、Fig.4.18に示されたコアバイパス出口流量を見ると、HPCS注入後コアバイパス出口流量は負となり、破断後96秒から162秒までに約80kgのHPCS水が流下している。その後いったん正の値を示し、184秒からは激しく変動しながら0～-7 kg/sとなるのがわかる。これらのことから計算上コアバイパスにはHPCS水が流下するが、バイパス孔を通して炉心に流入する量が実験に比べて少ないため炉心は完全にクエンチせず、炉心部での蓄水過程が正しく評価されなかったことがわかる。

以上、炉心内の流体挙動についてまとめてみると、ECC水による再冠水過程の模擬が計算結果では不十分であるが、ブローダウン過程からECC水注入の時点までの流体挙動及び燃料棒のドライアウト挙動等をかなりよく計算できているといえる。

4.5 下部プレナムの流体挙動

Fig.4.19に下部プレナム（C11）と炉心入口（C30）のボイド率の計算結果を示す。いずれのボイド率も破断後3.3秒でゼロから立ち上がり、3.3秒にプレナム・フラッシングが起こったことを示している。実験では4.2秒に下部プレナム・フラッシングが起きており、実験値との一致は比較的よい。下部プレナム・フラッシングが起きた後、両方のボイド率は徐々に増加

しほぼ一定値（C11は0.12，C30は0.55）になるが，その後徐々に減少してゆく。この減少はバイパスに流下したHPCS水が流入するためである。しかし，その後下部プレナムの流体はジェットポンプを逆流して流出してゆくために，炉心入口部では170秒，下部プレナムで220秒からボイド率は再上昇してゆく。

再循環ライン健全側・破断側両ループから下部プレナムに流入する流量と，下部プレナムから流出する流量の計算結果をFig.4.20に示す。各ジャンクションの流量は破断直後に再循環ポンプ・トリップにより単調に減少するが，破断後3.3秒に下部プレナム・フラッシングが起きると，いったん小さいピークを示した後急に減少する。破断後30秒まで流れは順方向を保っているが，その後大きな流量変動を示す。それは健全ループの片側でまず逆流が生じ順流にもどったあと，破断ループで同様の逆流が生じるというパターンを繰り返している。この流量変動はHPCS注入開始時刻まで続いた。HPCS注入後下部プレナム出口流量は激しい変動を示すようになるが，平均値は徐々に減少してゆき184秒以後は逆流となる。また，破断ループからの流入量は184秒以降，健全ループからの流入量は223秒以降逆流する。これはバイパスに蓄水したHPCS水が下部プレナムに流入し，蒸気発生により体積膨張して流出していくことを示している。実験データを見ると，圧力容器上下間の差圧はHPCS注入後徐々に増加し，下部プレナムと炉心にも蓄水していくことを示している（Fig.4.7参照）が，計算結果は炉心だけでなく下部プレナムでも蓄水過程の模擬が不十分であることを示している。この原因にはROSA-IVのジェットポンプを通過する二相流の流動抵抗が過少評価され下部プレナムから流体がジェットポンプ側に流出しやすいことや，バイパス部と炉心下部のモデリングが実際の装置の特性に適したものとなっていないと考えられること，がある。これらの点については更に詳細な検討が必要であるが，この検討は別の機会にする。

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

Exp.Data Case S

□ I PA 1 ○ I R APV2

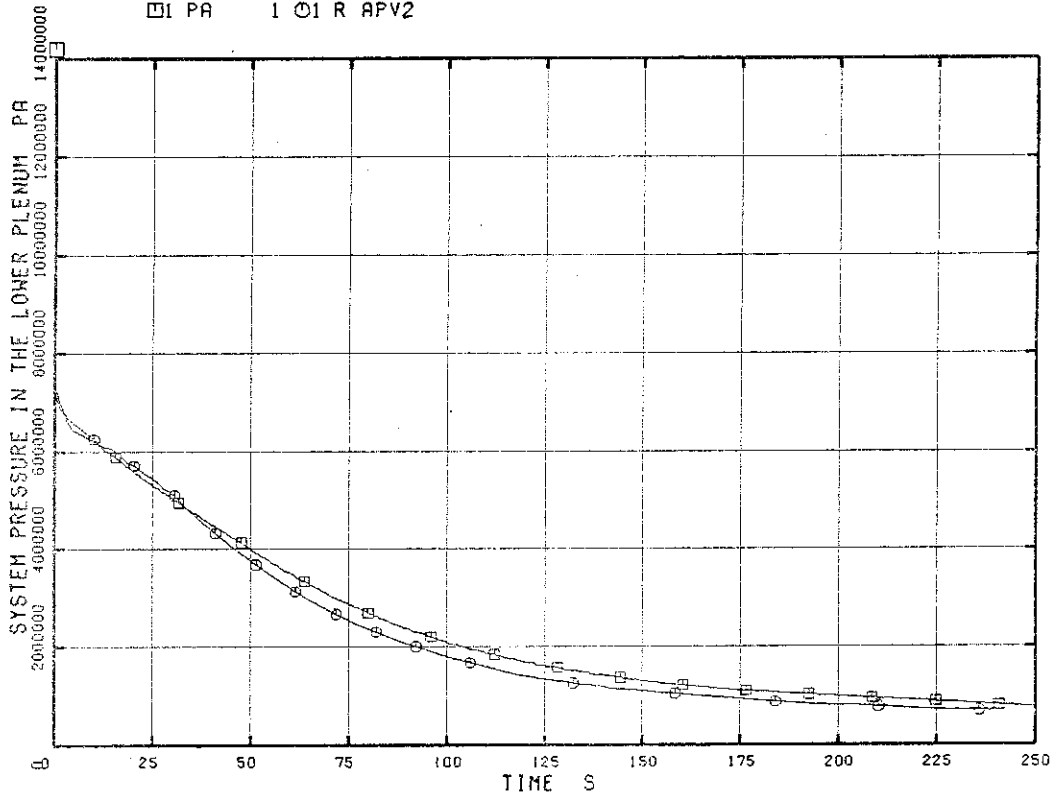


Fig. 4.1 Analysis compared with exp. data (lower plenum pressure)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS-RESULTS

Exp.Data Case S

□ I FM 72 ○ I R JWJ76

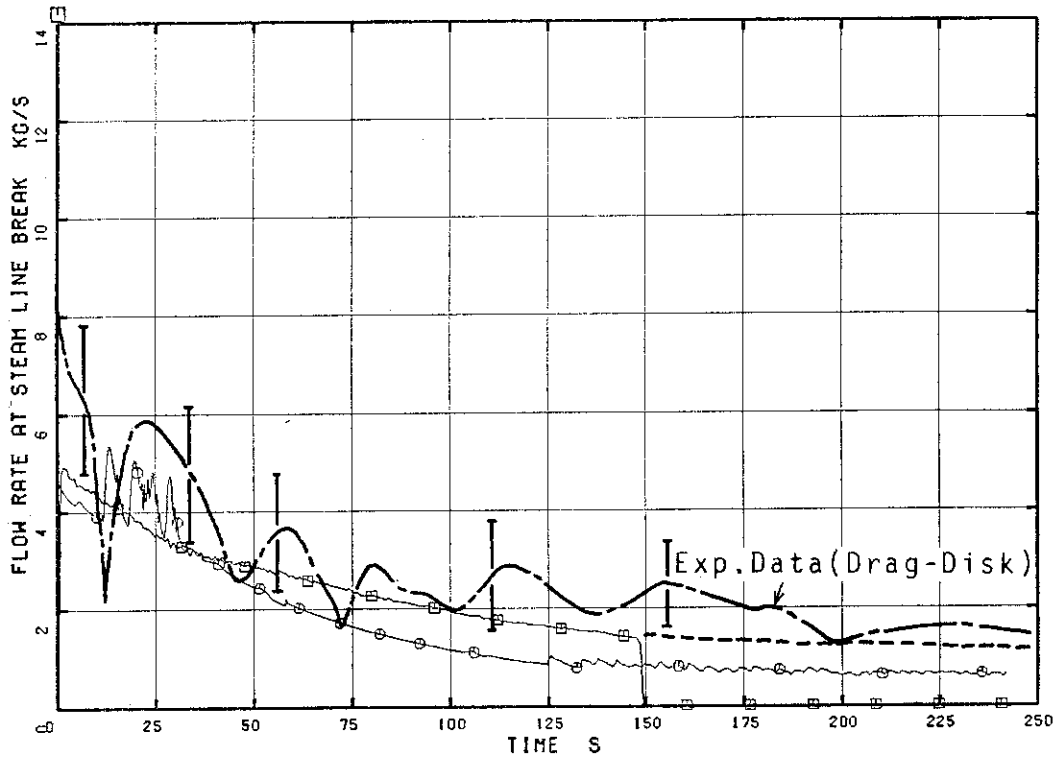


Fig. 4.2 Analysis compared with exp. data (steam flow rate)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

Case S
□ I R QEV68

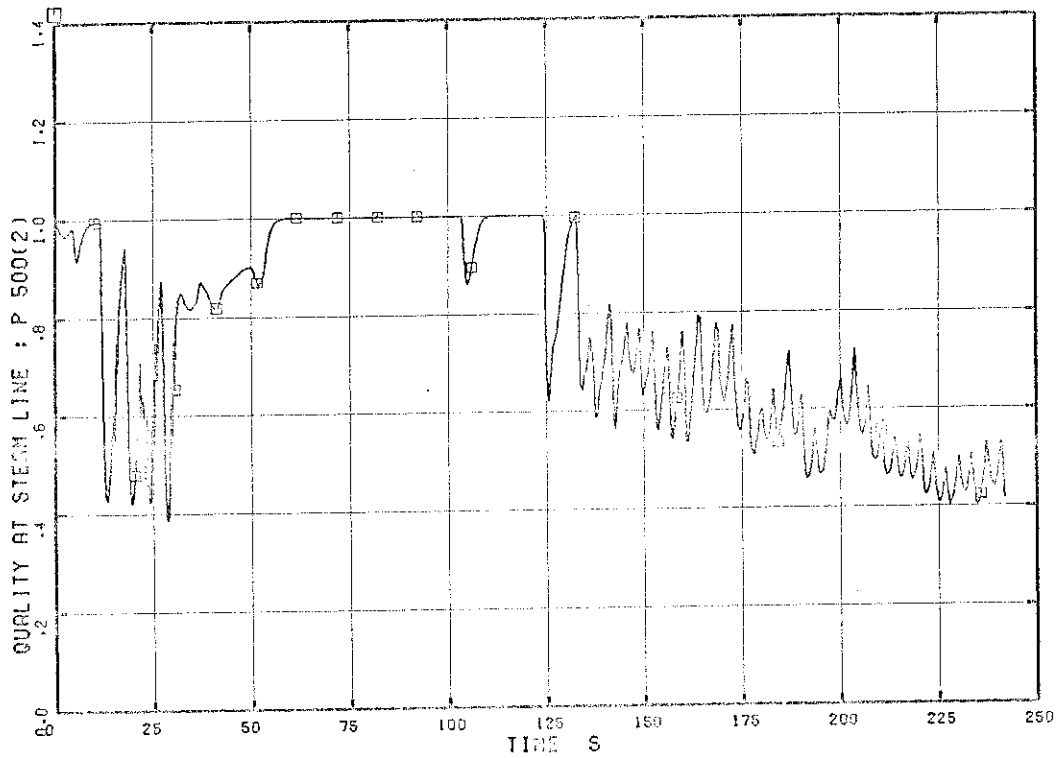


Fig. 4.3 Calculated fluid quality upstream the break (Case S)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS-RESULTS

Case S
□ I R APV24

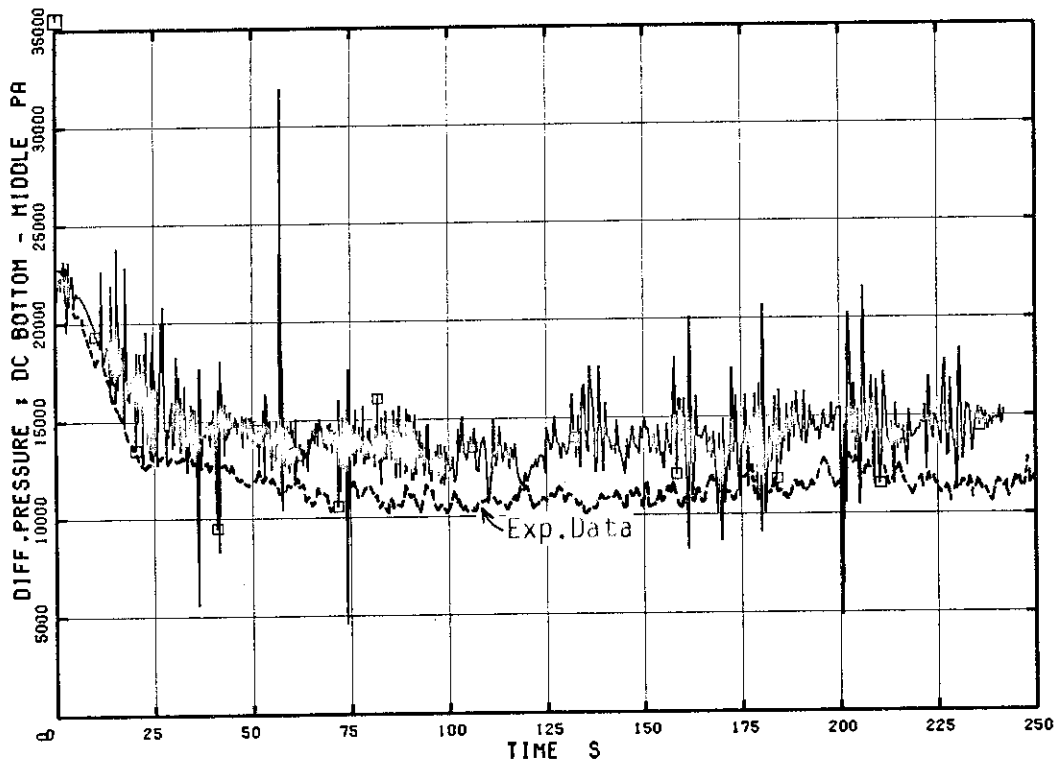


Fig. 4.4 Analysis compared with exp. data (differential pressure across the lower downcomer)

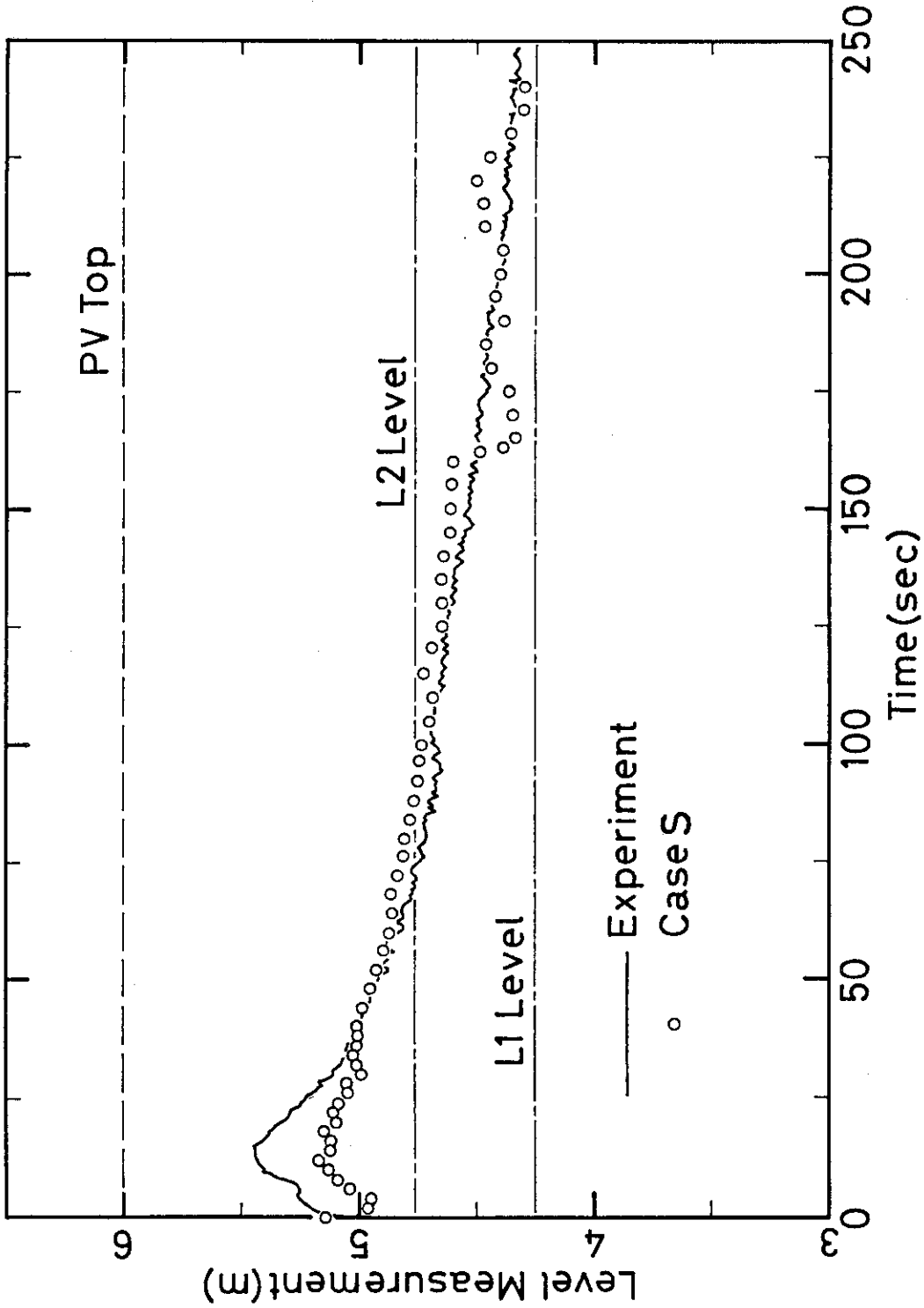


Fig. 4.5 Analysis compared with exp. data (upper downcomer water level)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

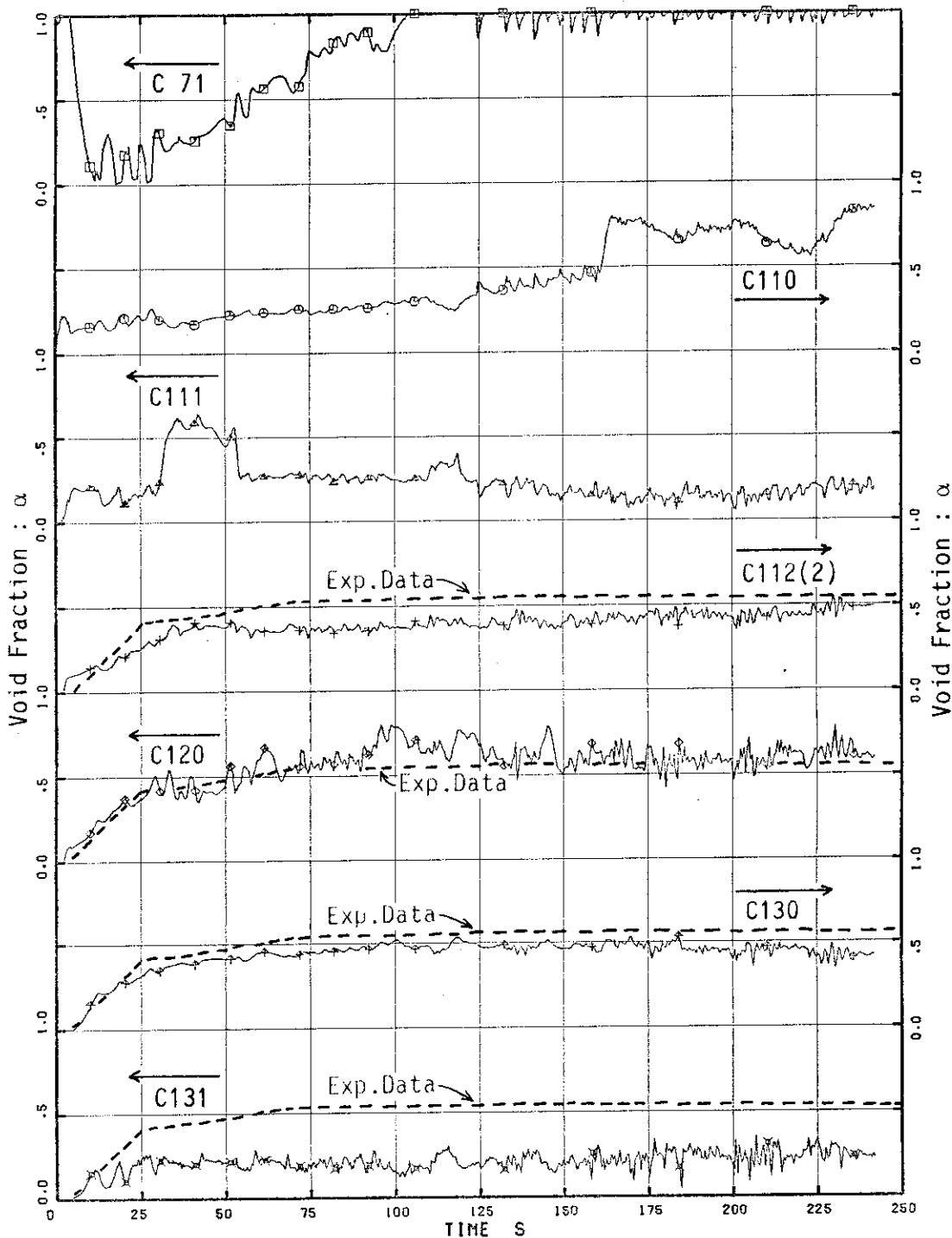


Fig. 4.6 Analysis compared with exp. data (void fraction in the downcomer)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS-RESULTS

Case S
 □ I R APV25

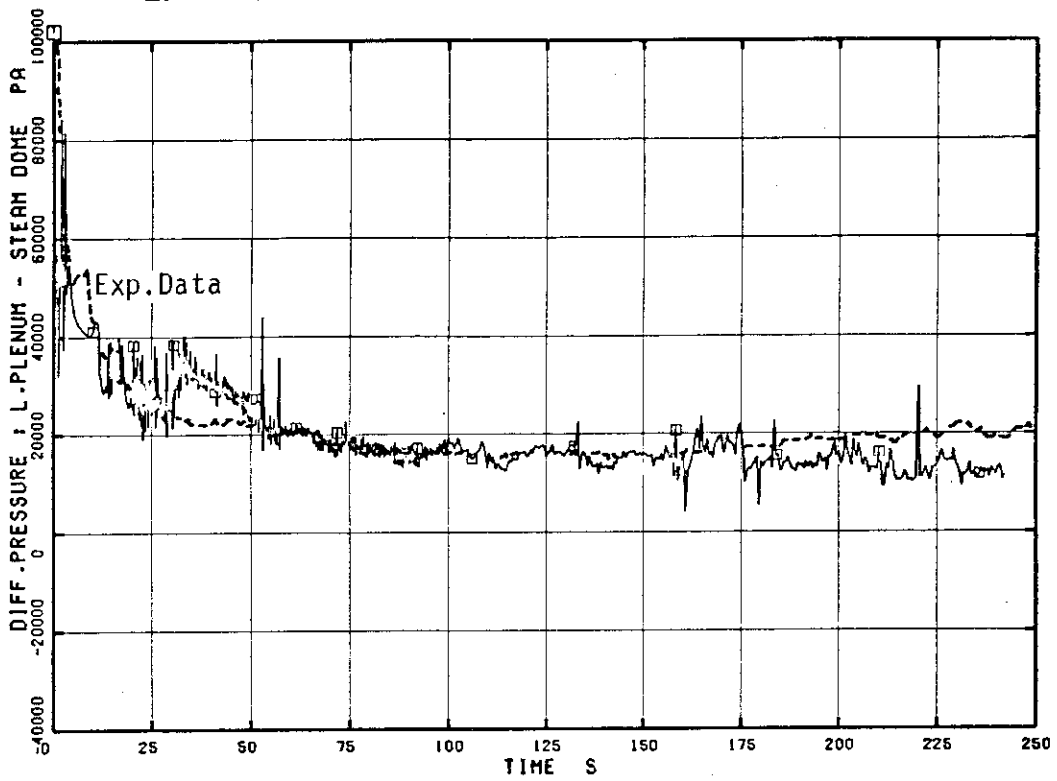


Fig. 4.7(a) Analysis compared with exp. data (differential pressure between lower plenum and steam dome)

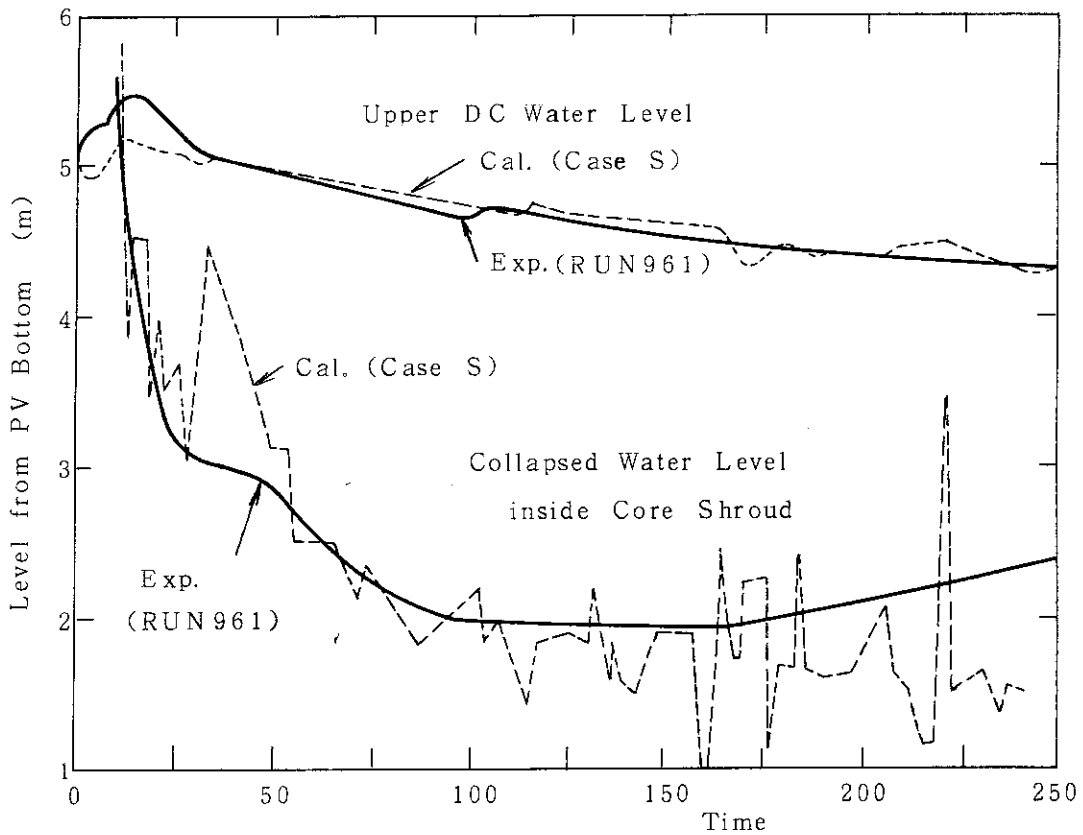


Fig. 4.7(b) Analysis compared with exp. data (collapsed water levels in pressure vessel)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

□ R AGV18 ○ R AGV17 △ R AGV16 + R AGV15 ◇ R AGV14
 † R AGV13 × R AGV12

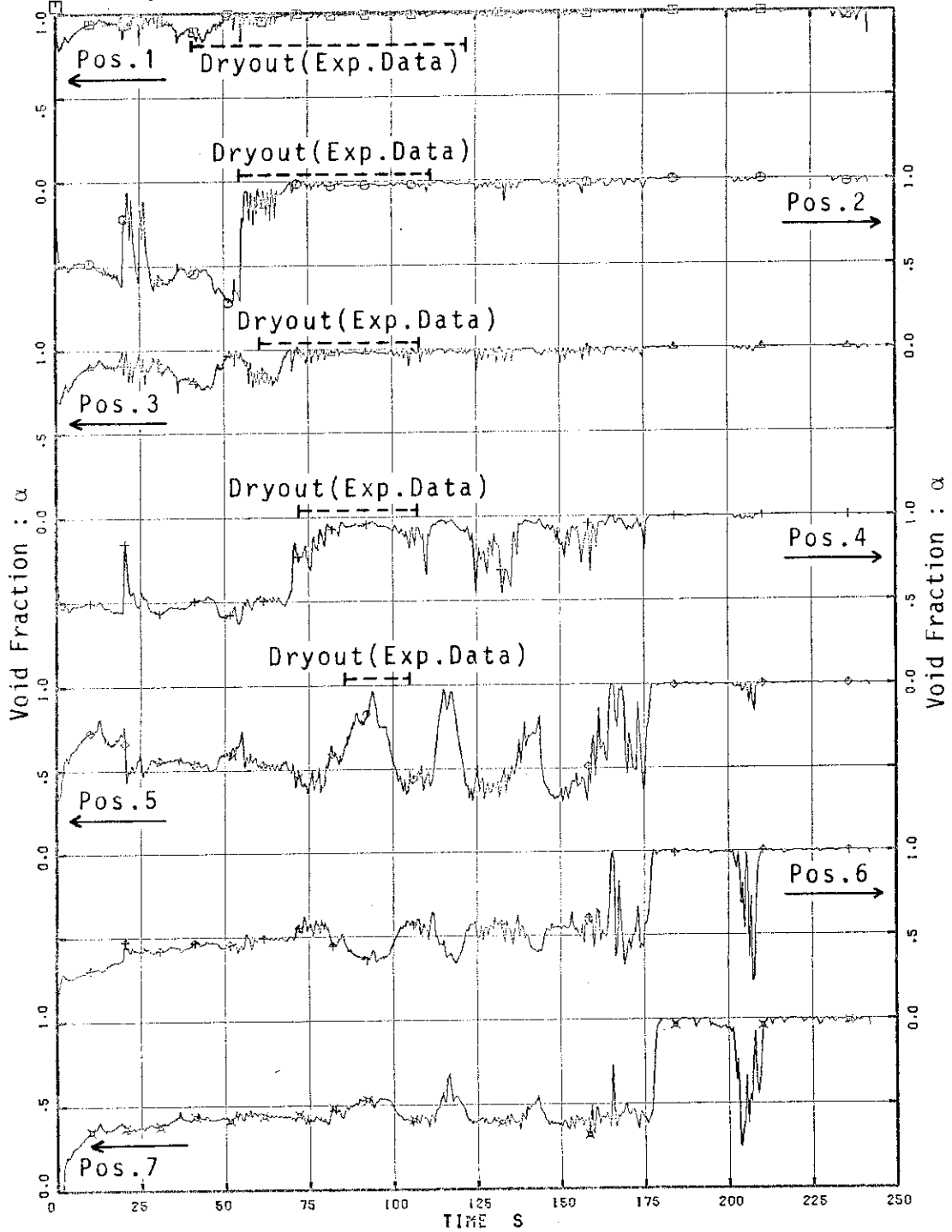


Fig. 4.8 Calculated void fraction in the high-power channel in the core

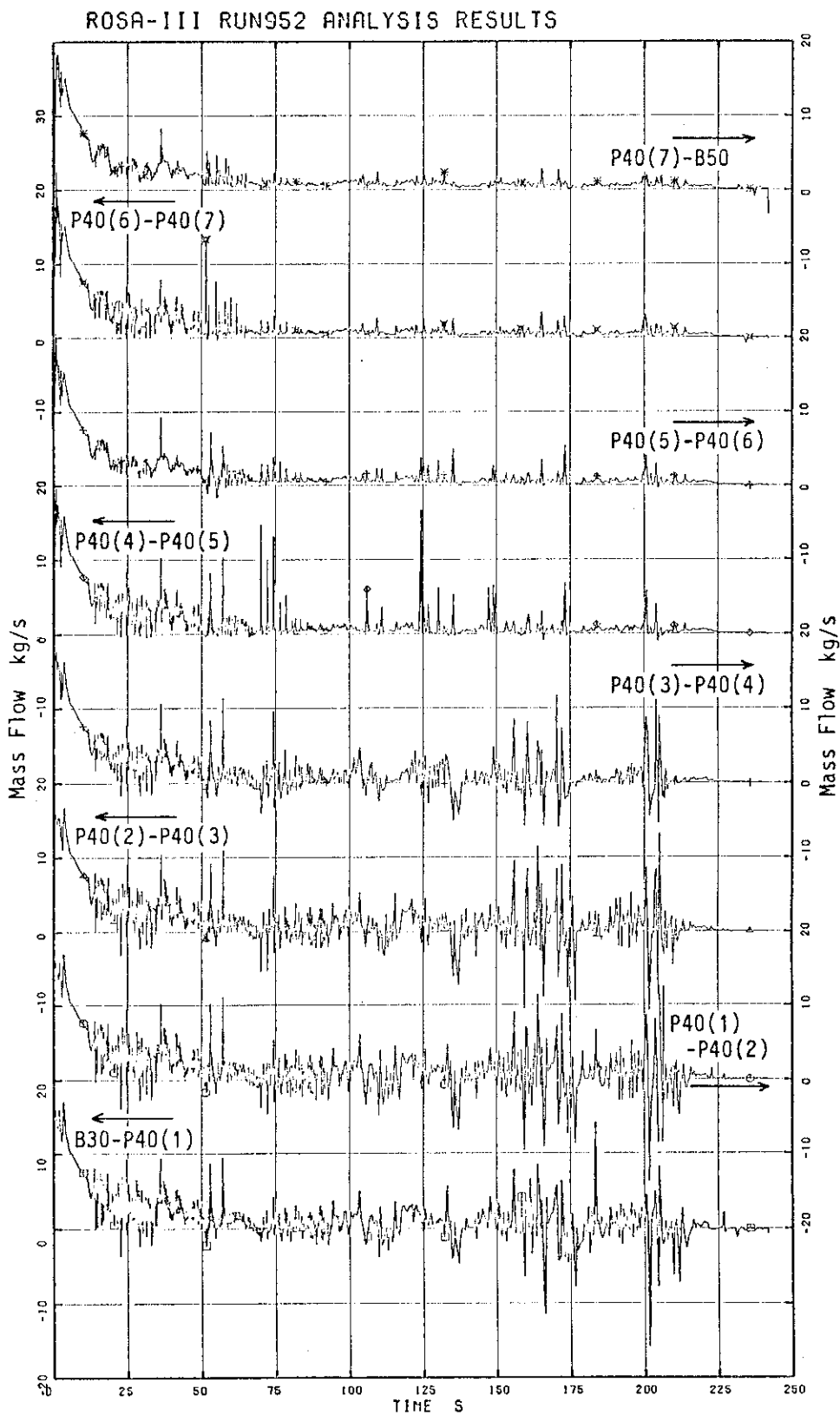


Fig. 4.9 Calculated flow rate through the average-power channel in the core

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

Exp.Data Case S

□ TE 201 ○ R TPS14

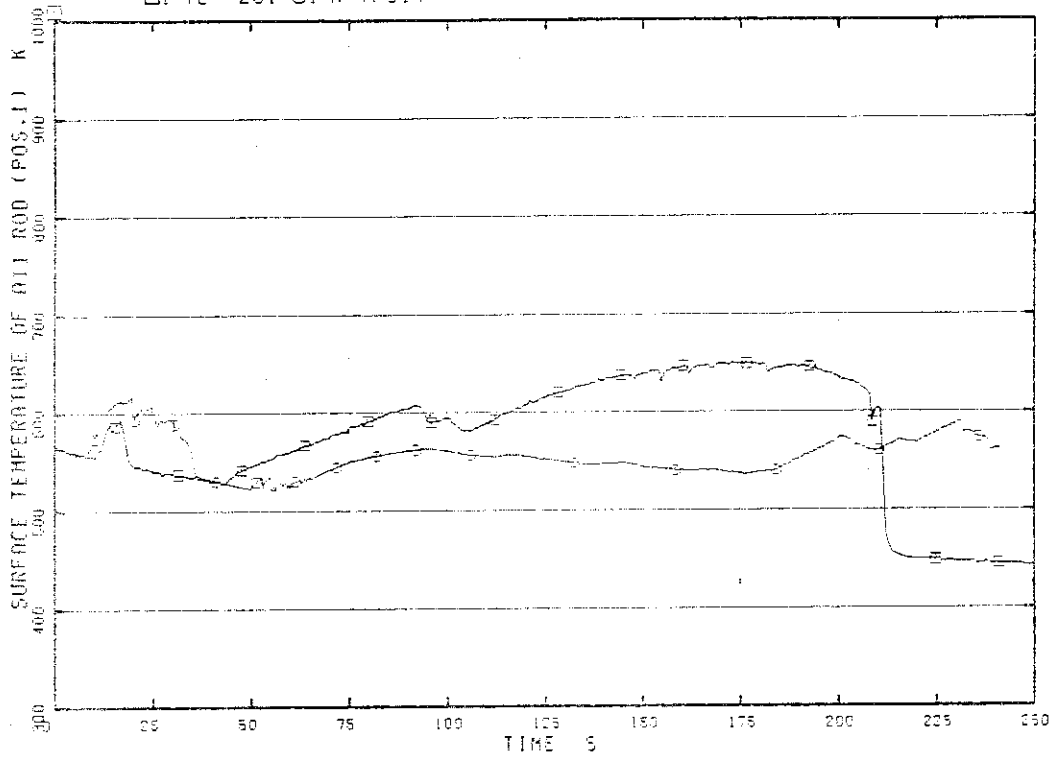


Fig. 4.10 Analysis compared with exp. data (fuel surface temperature at Position 1 of All rod)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

Exp.Data Case S

□ TE 202 ○ R TPS13

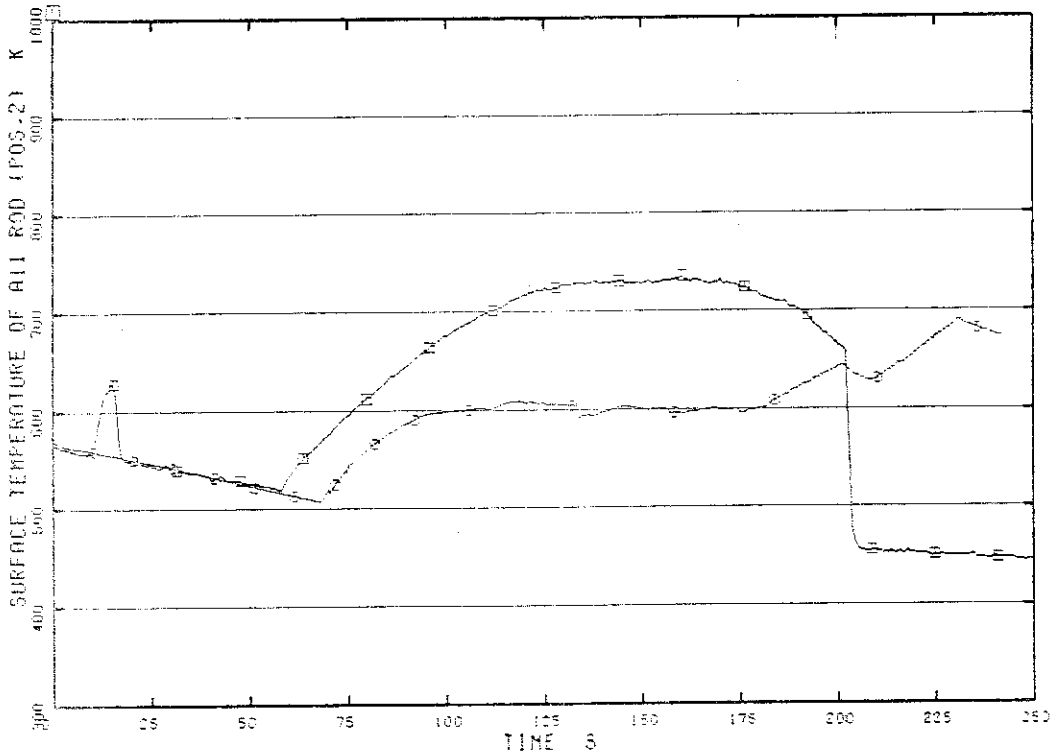


Fig. 4.11 Analysis compared with exp. data (fuel surface temperature at Position 2 of All rod)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS
Exp.Data Case S
□ TE 203 ○ R TPS12

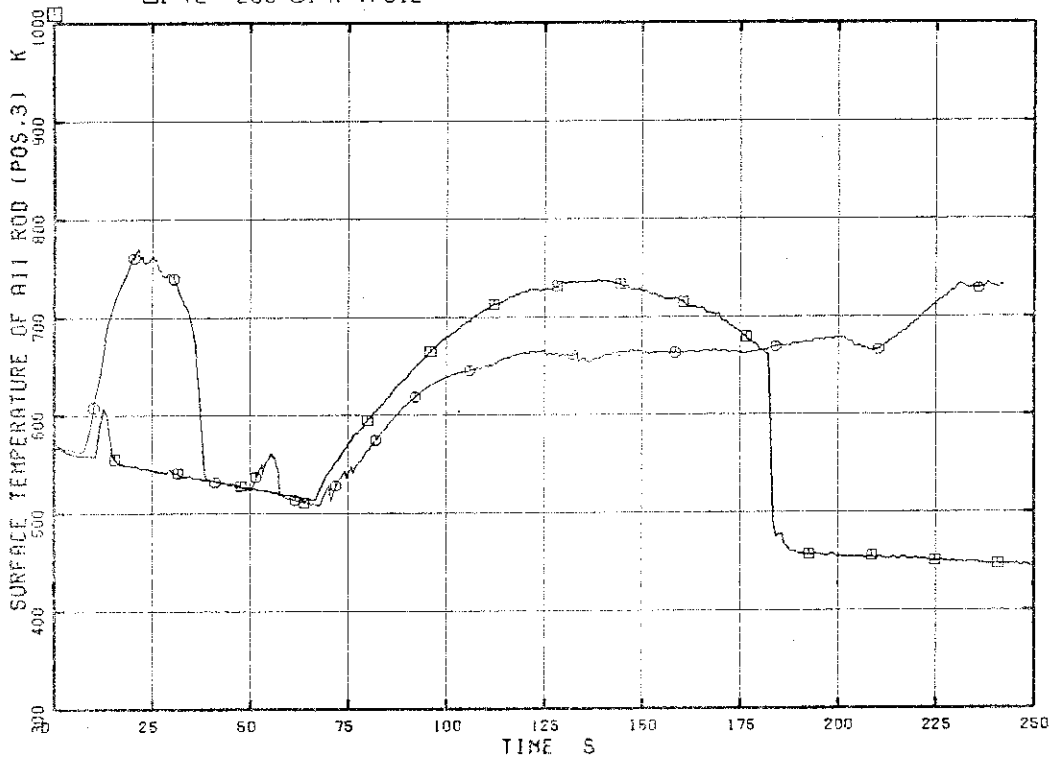


Fig. 4.12 Analysis compared with exp. data (fuel surface temperature at Position 3 of All rod)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS
Exp.Data Case S
□ TE 204 ○ R TPS11

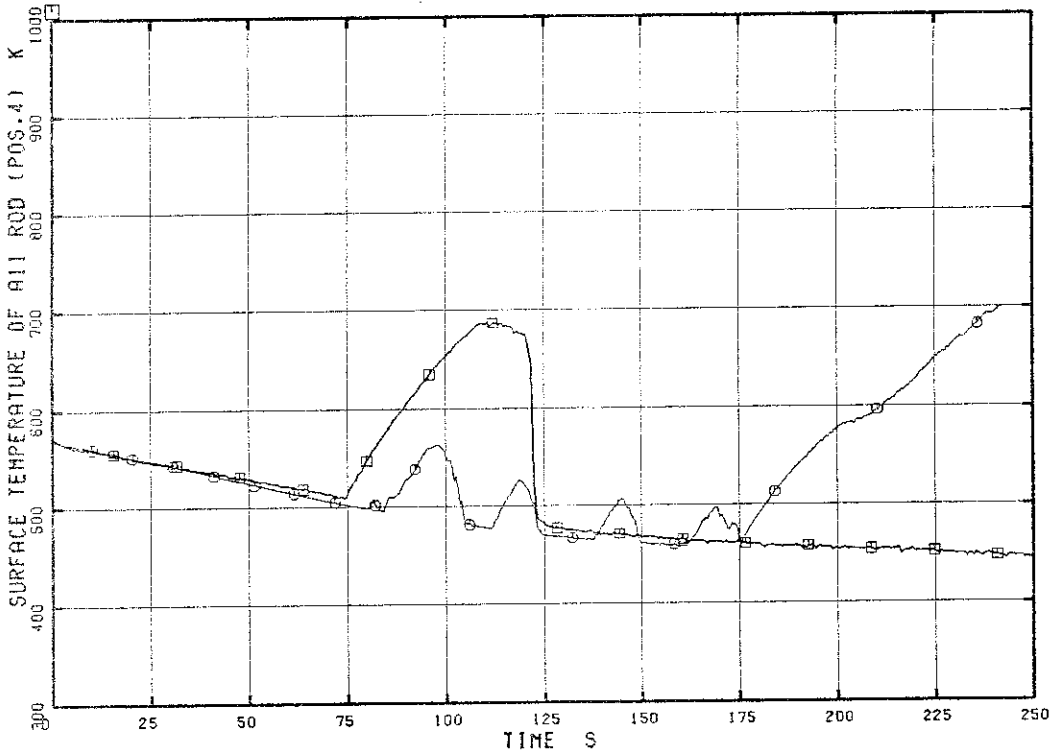


Fig. 4.13 Analysis compared with exp. data (fuel surface temperature at Position 4 of All rod)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

Exp.Data Case S

□ TE 205 ○ R TPS10

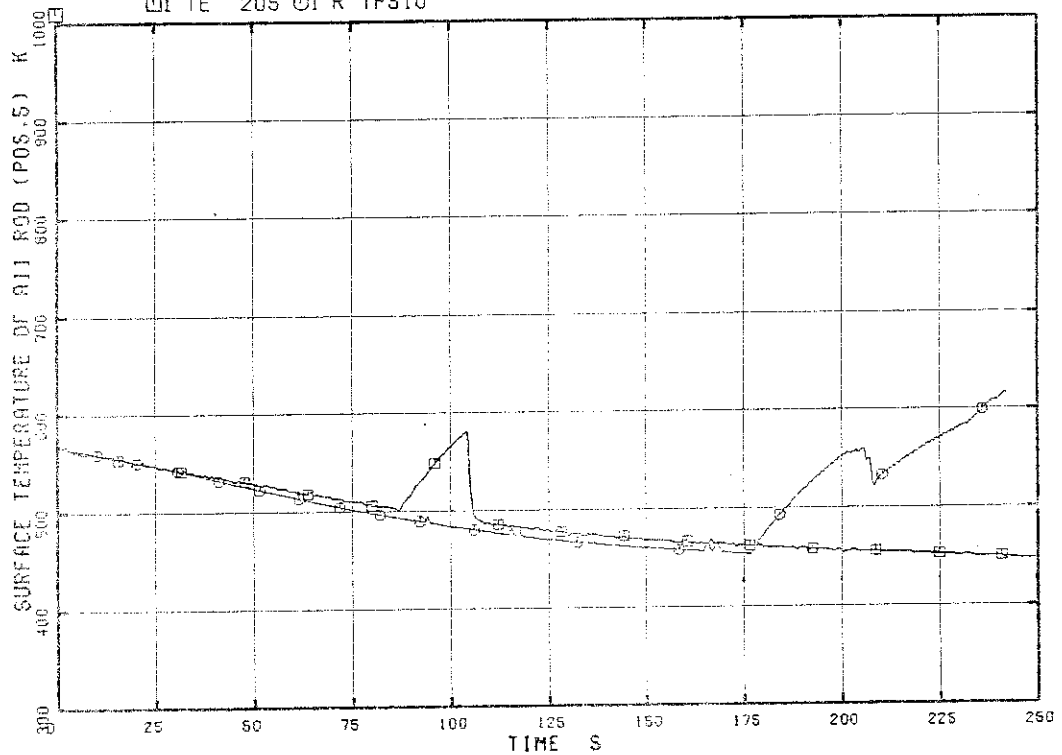


Fig. 4.14 Analysis compared with exp. data (fuel surface temperature at Position 5 of All rod)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

Exp.Data Case S

□ TE 206 ○ R TPS9

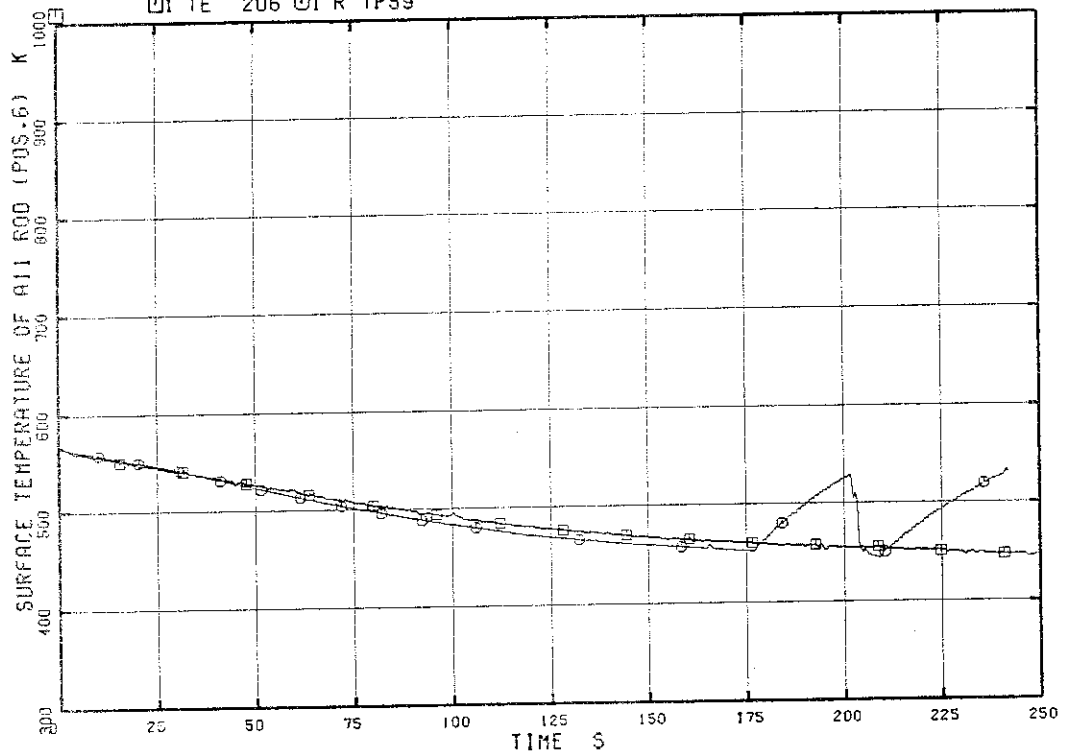


Fig. 4.15 Analysis compared with exp. data (fuel surface temperature at Position 6 of All rod)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS
 Exp.Data Case S
 □ I TE 207 ○ I R TPS8

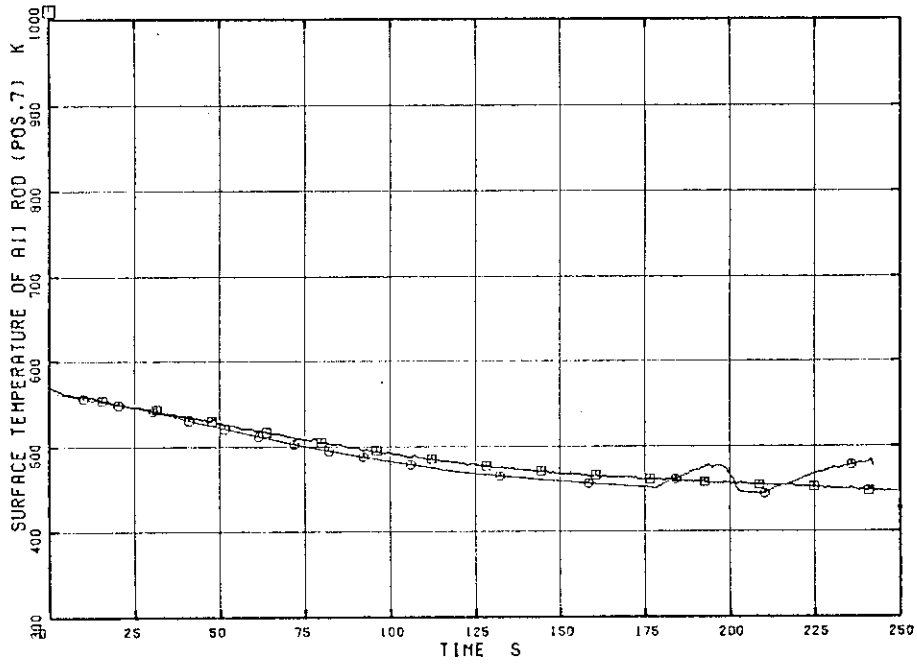


Fig. 4.16 Analysis compared with exp. data (fuel surface temperature at Position 7 of All rod)

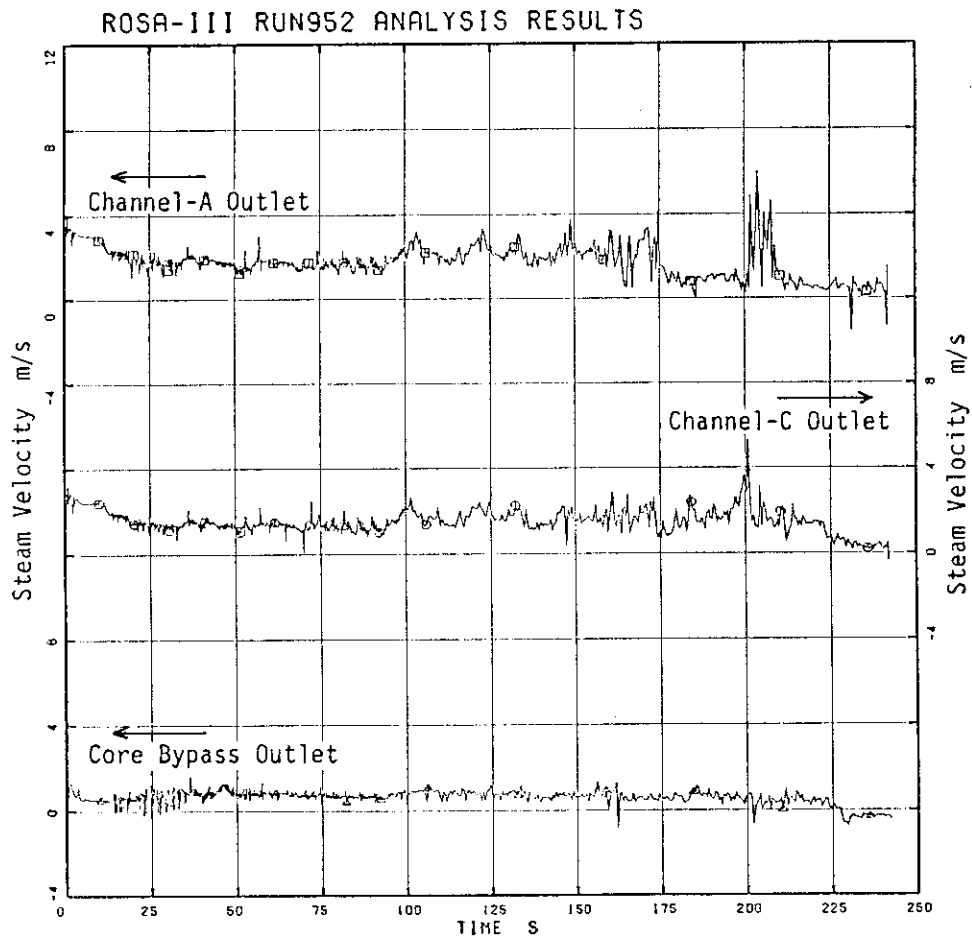


Fig. 4.17 Calculated steam velocities at the exits of core and core-bypass

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

Case S
 □ R JUN24

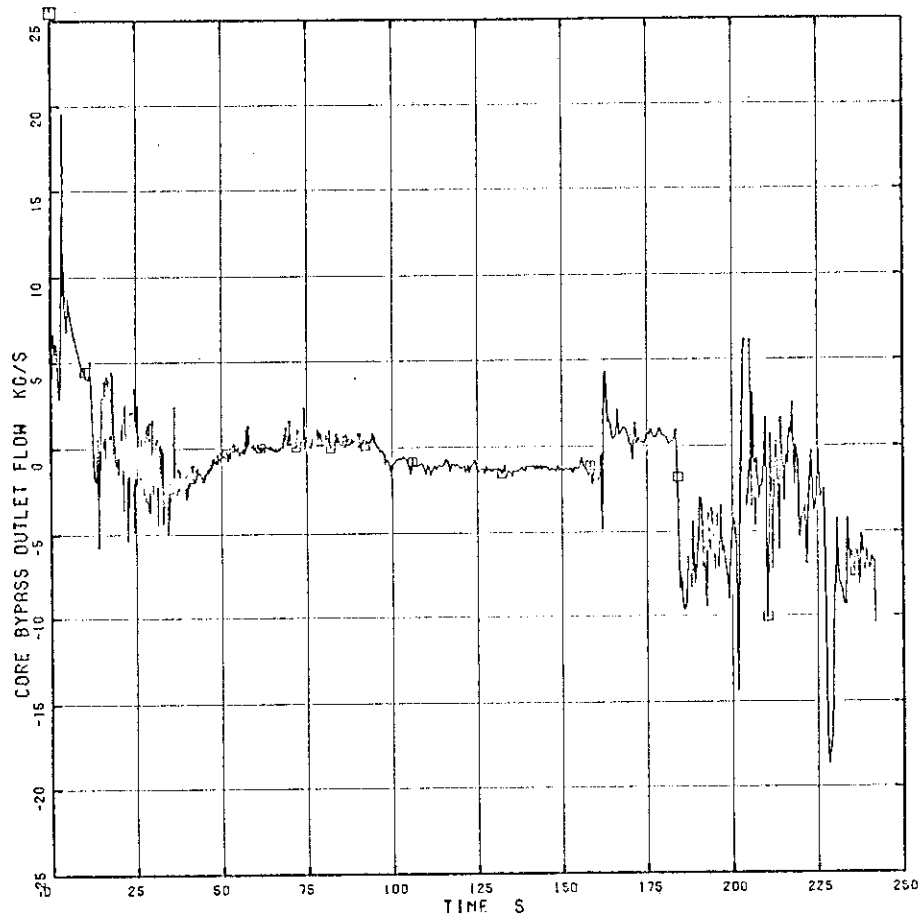


Fig. 4.18 Calculated flow rate at the exit of core-bypass

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

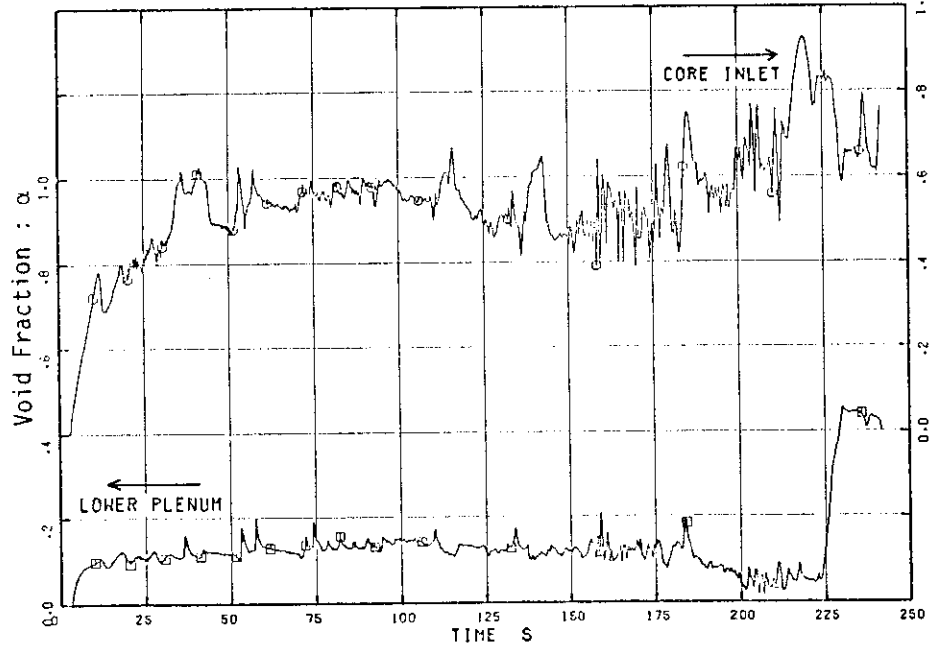


Fig. 4.19 Calculated void fraction in the lower plenum and core-inlet chamber

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

□ R JWJ1 ○ R JWJ4 △ R JWJ5

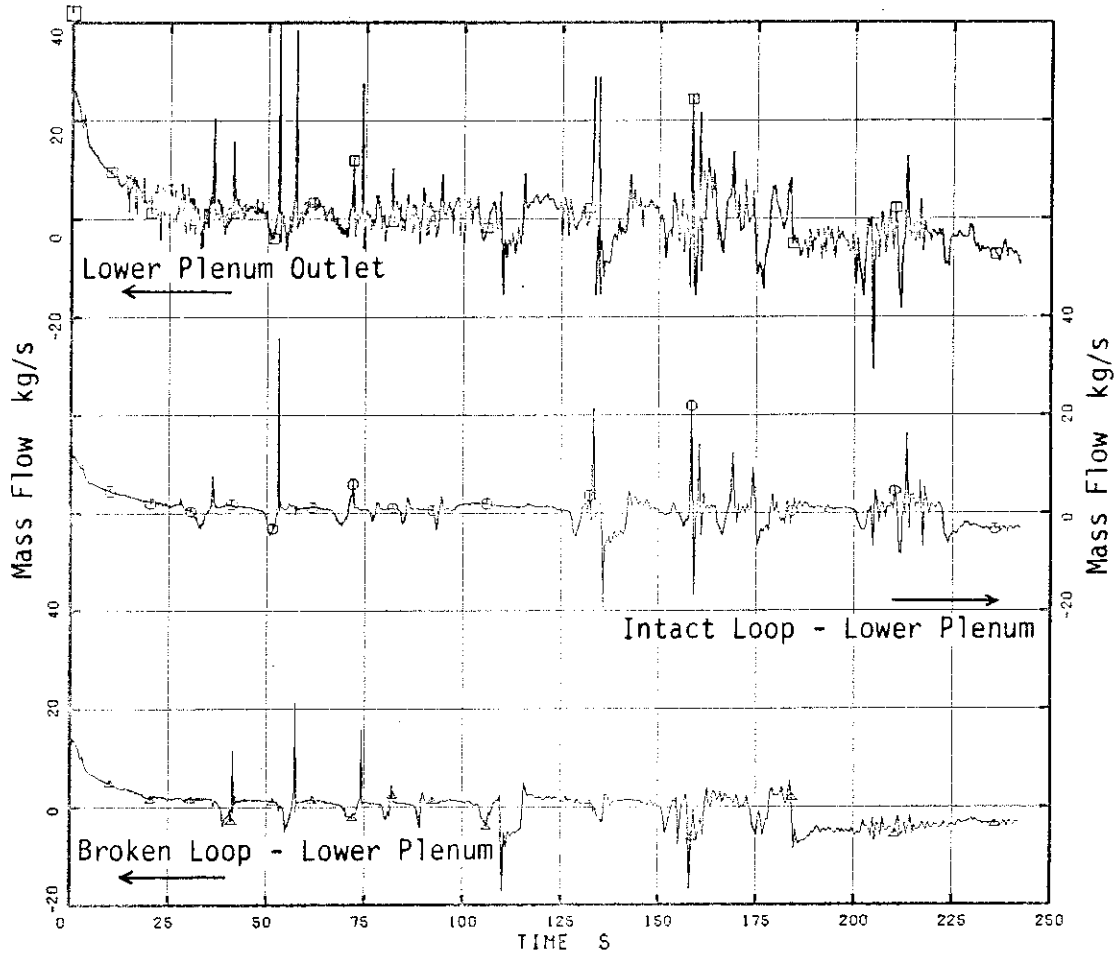


Fig. 4.20 Calculated flow rates into the lower plenum from jet pumps in the intact and broken loops

5. 感度解析の結果

3章で述べたように、今回の解析に用いたRELAP5/MOD1コードのモデルの特性を検討するために、主蒸気管100%破断実験RUN952を対象とし、3種類の感度解析を行なった。すなわち、その1つは主蒸気管の破断流量計算に関して放出係数を変化させた解析(ケースD)、2番目のはケースSのノーディングのうち、気水分離器の部分にセパレーターモデルの代わりにブランチモデルを使用した解析(ケースB)、3番目のはケースSのノーディングから圧力容器壁を模擬したヒートスラブを全部取り除いた解析(ケースH)である。ケースHは、ROSA-IIIでは単位流体容積当たりの構造材容積が実機条件より大きいという点をふまえて、解析上圧力容器壁の熱放出の影響を見るためのもので、この点についてのROSA-III実験装置と実機との相似性を検討する上でも参考にすることができる。

5.1 蒸気流に対する放出係数の影響

主蒸気管破断実験の場合、破断後系内から流体が流出する場所は主蒸気管のみであるため他の破断実験に比べて流出蒸気流量と系圧力の関係が明瞭である。特に本報の100%破断実験は流出蒸気流量が最大であり、系圧力の減圧効果が最も顕著なものである。流出蒸気流量と系圧力について実験データと解析結果を比較し、蒸気流出に関する解析モデルを評価する上で最もふさわしいものである。そこで、放出係数を1.0、0.6、0.5と変えた場合の解析結果と実験結果を比較する。前章に示したケースSは放出係数=0.5の場合である。また、放出係数=0.6の場合がケースD、1.0の場合がケースAである。ただし、ケースAは本実験解析において最初に行なわれたケースであるため、そのノーディングは気水分離器の部分にpipeモデルを使っているという点で他の2つのケースとやや異なっている。

ケースAはRELAP5/MOD1コードの蒸気流に対する臨界流モデルそのものによる計算であるが、蒸気ドームから主蒸気管の破断口オリフィスに至る部分の容積、形状、抵抗係数等を実験装置に合わせて正しく与えても過大な蒸気流量を計算し(Fig. 5.1)、この結果系圧力は実験データの圧力より著しく速く減圧した(Fig. 5.2)、このことから考えられる原因は2つある。1つは単相流下の抵抗係数を正しく与えても二相流下ではボイド率等に応じて圧損が著しく増大する場合があり、本解析においてこの圧損を過小評価していないかという点である。RELAP5/MOD1コードではボリューム内の二相流圧損を修正Baroczy correlationにより計算しており、単管部分については特に問題はない。問題は曲がりやT字路の二相流圧損であるが、実験データの場合に蒸気ドーム圧力と主蒸気管内の圧力の差から推定した、蒸気ドームと破断口オリフィスまでの圧損値と解析結果はよい一致を示しており、主蒸気管内の二相流圧損はよく模擬されていることが確認された。従って過大な減圧の原因は別にある。第2の点は、二相流(ボイド率が高く、飽和蒸気流に近い場合も含む)の臨界流モデルが正確な計算を行っていないことによるものと考えられる。

Fig. 5.1の破断流量を見ると、放出係数が0.5より大きくなるにつれて破断流量が増加し実験結果から離れていくのがわかる (Fig. 4.2 参照)。放出係数を1.0にしたケースAの場合、破断流量の計算結果は破断直後には実験値 (O) の約2.8倍も大きい値をとる。ただしこの場合、気水分離器をパイプとして扱うため炉心からの上昇二相流が蒸気ドームに流入するので、蒸気ドームから流出する蒸気管内流体のクオリティーが低下し質量流量が増加している。放出係数が0.5の場合に実験結果とよく一致するのであるから、放出係数1.0の場合は気液分離がよく模擬されれば、流量の実験データに比べて2倍程度の過大評価ということになるであろう。ケースDの破断流量は破断後40秒まで実験値 (O) より大きい値を示しているが、系圧力が実験結果より小さくなるにつれて次第に減少し、45秒以後実験値 (O) より小さい値を示す。また破断流量に現われるピークはケースSと同様に低クオリティーの流体が破断口から流出するために現われ、ケースSと比べて数も多く高さも高くなっている。

Fig. 5.2に下部プレナム圧力の計算結果を実験結果と比較して示す。放出係数による系圧力の変化を見ると、0.5のとき (ケースS) は破断後35秒から実験結果より小さくなっていくのに対し、0.6 (ケースD)、1.0 (ケースA) のときはそれぞれ25秒、12秒から実験結果との不一致を示すようになり、放出係数が0.5より大きいほど減圧が速くなり実験結果との一致が悪くなるのがわかる。ケースDでは系圧力は破断後25秒から急に減少し実験結果との一致が悪くなるが、その後70秒くらいから減圧はゆるやかになり、HPCS注入後系圧力はやや回復し実験結果より約0.5 MPa 低い値を保って維持するようになる。

なお以下の比較において、ケースAの系圧力の結果は実験結果と比較的早くから違ってくるため、圧力容器内の流体挙動に関するより詳細なデータの比較は困難となるので、ケースAの計算結果と実験結果との比較は圧力と蒸気流出流量のみとする。

次に圧力容器内の残存水量に関する放出係数の影響をみる。Fig. 5.3, 5.4にケースDの下部ダウンカマの差圧とコアシュラウド内の差圧を示す。破線はRUN952の実験結果を示す。またノーディングの関係で、下部ダウンカマの差圧の計算結果は実験結果より定常状態で約1100 Pa 大きい値を示す。ケースSの計算結果はFig. 4.4と4.7を参照する。

下部ダウンカマの差圧は破断後20秒までは実験結果より約1000 Pa ほど小さい値を示す。その後計算結果は大きな変動を示しながら1300~1500 Pa の間の値をとるようになり、実験結果と定性的に合っているがやや大きい値を示している。Fig. 4.4のケースSの結果と比較してみると、ケースDはケースSより全体的に変動が大きく破断後20秒までの値が小さいが、それ以後の結果には大きな差異は見い出せない。

コアシュラウドの差圧について、Fig. 4.4のケースSの結果と比較すると、(1)破断直後の破断流による加速効果が現われない(2)下部プレナム・フラッシングの後、実験値より小さい値を示して振動しながら減少する(3)HPCS注入による蓄水過程が見られず175秒以降徐々に減少してゆく、という点は両者に共通している。50秒以後あまり大きな差はないが、ケースDはケースSに比べて全体的に変動が大きい。

次に炉心内のボイド率、燃料温度に及ぼす影響を見る。Fig. 5.5にケースDのチャンネルAの各ポジションにおけるボイド率を示す。破線はケースSの解析結果を示している。ケースSに比べて流出する流量が大きいため、ケースDのボイド率はいずれのポジションでもケース

Sの結果より大きい値を示し、早く炉心が蒸気中に露出することを示している。ポジション4から下ではその差が顕著である。ケースDの結果でもHPCS注入による蓄水が計算されないため、破断後115秒で全てのポジションでボイド率が1になってしまうが、このことはケースSと同様に炉心入口部からチャンネルAへ流入する流量がゼロになったことと対応している。またケースDでもポジション2と4でその前後のボリュームに比べてボイド率が異常に低くなるという挙動を示す問題が破断初期にみられる。

炉心部のボイド率は燃料棒表面温度挙動に直接影響を与える。Fig. 5.6から5.12にケースSとケースDの結果と対応するA11ロッドの表面温度の実験データを各ポジション別に示す。ケースDの結果はボイド率がケースSより高いのでケースSよりやや高い表面温度を示すが、定性的にはケースSとよく一致している。しかし破断後115秒にボイド率が全てのポジションで1になるため、ケースDの表面温度はケースSより早く上昇し、再冠水過程は見られない。

以上の比較から、放出係数をケースSの0.5から0.6に変えたケースDでは(1)破断流量がケースSよりも増加し、(ケースDの差圧の結果は変動が激しくケースSとの比較が困難なため差圧の比較のみからは明確に言えないが)系内の残存水量は減少した(2)炉心部ボイド率は高出力チャンネル・平均出力チャンネルともケースSより高くなった。このため、ケースDの燃料棒表面温度はケースSより早く上昇開始した。なお、実験結果の温度上昇開始時刻はケースSとケースDの間であることがわかった。

5.2 セパレーター・モデルの影響

ケースS、ケースDでは、気水分離器を表わすボリューム(C61)をseparatrとして計算を行なった。separatrコンポーネントは蒸気ドームへは蒸気しか通さず破断流のクオリティを高く見積るため、その計算結果は実験結果と比べて破断流量が少ないのに減圧速度が速く、残存水が(特にダウンカマー部で)多くなった。しかし実際の気水分離器において分離効率は流速やボイド率に依存し、100%の気水分離が行われているとは考えにくく、飽和水は蒸気ドームにも流れ込むものと考えられる。

そこでこのセパレーターモデルの特性を見るために、ケースSのノーディングのうち気水分離器を表わすボリューム(C61)のみseparatrからbranchに変えて計算を行なった。これをケースBと呼ぶ。

Fig. 5.13にケースBの気水分離器(C61)に継がる各ジャンクションの流量を示す。またFig. 5.14にそれぞれのジャンクションの蒸気流速を示す。ここでこの2つの図の破線はケースSの計算結果を示している。Fig. 5.13よりケースBの気水分離器から蒸気ドームへ流れる流量は、ケースSに比べて数倍～十数倍に増加しているのがわかる。ところがFig. 5.14の蒸気ドームへ流れる蒸気流速を比較してみると、ケースBの蒸気流速はケースSの2倍程度で流量における違いほどは大きくないことがわかる。これはケースBの気水分離器から蒸気ドームへ抜ける流れのクオリティが、ケースS(この場合1.0である)に比べてかなり低いためである。またケースBの気水分離器からダウンカマーへ流出する質量はケースSに比べてかなり減少し、特に破断後10～70秒までは逆流を起こしダウンカマー部分から気水分離器へ流れるのがわ

かる。

Fig. 5.15 にケースBの主蒸気管破断流量を実験結果、ケースSの計算結果と比較して示す。また、Fig. 5.16 にケースBの破断流のクオリティーを示す（破線はケースSの結果である）。ケースBの破断流量はつねにケースSの結果より大きい値を示し、破断後70秒までは実験値（○）よりも大きい値を示している。これはケースBの破断流のクオリティーがケースSより小さいためであることが、Fig. 5.16を見ればわかる。ケースBの破断流は下部プレナム・フラッシング（破断後4.0秒）以後激しくクオリティーが変動するので、破断流量は70秒まで約kg/sの変動を示して推移し、ケースSのように目立ったピークが現われることはない。ケースBのクオリティーは破断直後に約0.6に下り、その後激しく変動して0.5～0.7の値を示しながら徐々に増加して行くが、破断後94秒に起こるHPCS注入により減少に転じる。またケースSのクオリティーと比較すると、破断後150秒までケースBの方が0.2～0.4程度小さい値を示しているのがわかる。

Fig. 5.17 にケースBの下部プレナム圧力を示す。ケースSよりも破断流のクオリティーを小さく、その結果破断体積流量を小さく評価したために、ケースBの減圧速度はケースSより遅くなり、その系圧力はつねにケースSより大きい値を示している。また実験結果と比較してみると(1)破断後2.9秒にケースBの減圧速度が減少するため、ケースBの系圧力は実験結果より約0.3MPa大きい値を示して推移するが、25秒以後減圧速度の増加につれて実験結果に近づき、50秒に再び一致する(2)破断後65秒ケースBの減圧速度が再び減少して系圧力が実験結果より大きくなるが、HPCS注入後減圧が速くなり110秒に実験結果と一致することがわかり、圧力に関する限りケースBの方が計算の最後までケースSよりも実験結果と一致しているといえる。

またFig. 4.2に示された実験値（D）の傾向を参照して、ケースBの破断流量と系圧力の関係を見ると、(1)減圧速度がよく一致している破断後25秒までは、ケースBの破断流量も実験値（D）とよく一致している(2)系圧力が実験結果と一致する破断後110秒以後は、ケースBの破断流量に実験値（D）と同様なHPCS水の流出による流量増加と変動が現われることがわかる。

Fig. 5.18にケースBのダウンカマー部のボイド率を示す。破線はケースSの計算結果である。これを見ると、ボリューム；C112より下のボイド率はケースSとほぼ同じで残存水量が等しいことを示しているが、C111のボイド率はケースSよりやや低く、逆に蒸気ドームと上部ダウンカマー（C71, C110）では高くなっていることがわかる。これら3つのボリュームのボイド率は、破断後67秒までは蒸気ドームからダウンカマーへの落下流量（Fig. 5.19参照）とダウンカマーから気水分離器へ逆流する流量（Fig. 5.13参照）によって支配されている。ボイド率を比較すると、ケースBのダウンカマーの残存水量の方がケースSに比べて若干少ないことがわかる。

Fig. 5.20にケースBのチャンネルAの各ポジションにおけるボイド率を示す（破線はケースSの結果である）。ケースBのボイド率は破断後26秒にポジション1がドライアウトした後、上から順にドライアウトしてゆき63秒にはポジション6がドライアウトする（ポジション7もボイド率が上昇するがドライアウトはしない）。その後ポジション6から（破断後72秒）

順に上に向かってリウエットしてゆく。リウエットした後ポジション1～4のボイド率は再び上昇して1.0近い値を示すが、ポジション5～7ではボイド率はほぼ0.5を保っている。これよりケースBの炉心部残存量は破断後約75秒まではケースSより少なく、それ以後はケースSよりも多くなることがわかる。ケースBのボイド率はケースSの結果と比べるとドライアウトする時刻が早い。ケースSのドライアウトする時刻が実験結果とよく一致していたことを考えると、ケースBのドライアウトの時刻は実験結果より早いと言える。またHPCSがまだ注入されていない72秒からリウエットが始まる。これはダウンカマーから気水分離器に逆流した低クオリティーの流体が、破断後63秒にコアバイパスを通過して炉心部へ流入したことによる（Fig. 5.13参照）。

ケースBとケースSのボイド率の傾向が著しく違っていることは、この2ケースの燃料棒表面温度の挙動にも反映している。Figs. 5.21～27にA11ロッドの各ポジションにおける表面温度を示す。これを見ると、ケースBでドライアウトしないか、ドライアウトした時間が短いポジション6、7の結果はケースSとよく一致しているが、ドライアウトの時間が長いポジション1～5ではケースBの結果はケースSよりドライアウトが早く、HPCSが注入される前にクエンチしており、ケースSほど実験結果と一致していないのがわかる。

ここで、各ケース間で系圧力が一致していると飽和温度は等しくなりドライアウトしない燃料棒表面温度は比較的一致しやすいことを考えると、ケースSの方がケースBよりも実験での炉心部の挙動をよく計算していると言える。

以上の比較から、気水分離器にブランチモデルを適用したケースBでは(1)破断流のクオリティーがケースSより低下し、実験結果をよく模擬している。そのため、系圧力の計算結果は全計算時間にわたって実験結果とよく一致した(2)しかし、気水分離器から蒸気ドームへの流量は破断後68秒まで10～30kg/sの値を示し、実験結果の破断流量（せいせい8kg/s）や初期炉心流量（約16kg/s）と比較して非常に大きく、過大評価している。これは「気水分離器から蒸気ドームへ流出する流体は飽和蒸気のみである」というセパレーターコンポーネントの制限を取り除いた結果、ダウンカマーから気水分離器へ大量に逆流した低クオリティーの流体が気水分離器出口の流量に加わったためである(3)このため系内では「気水分離器→蒸気ドーム」、「蒸気ドーム→ダウンカマー」、「ダウンカマー→気水分離器」の大きな流れが生まれ、まだHPCSが作動していない破断後63秒にこの流量の一部がコアバイパスを通過して炉心部へ流入した（5.28参照）。その結果、ケースBの炉心部の挙動はケースSほど実験結果と一致しないことがわかった。

なお、気水分離器の気水分離効率も流速、ボイド率、圧力等により変化するが、第一義的には流速によるであろう。ROSA-IIIの場合には、上記セパレーターモデルとブランチモデルによる計算結果の中間的な挙動を示すものと考えられる。

5.3 圧力容器壁の蓄積熱の影響

ROSA-III実験装置で得られた実験結果から実炉のLOCA時の挙動について言及する場合、つねに考慮されなければならないことはROSA-III実験装置の実炉に対する相似性とその限界である。ROSA-III実験装置の相似性の限界の一つに「ROSA-III実験装置の構造材が実機に比べて相対的に厚いため、ROSA-III実験は構造材の熱容量の影響を実炉より強く受ける」ということがある。これは、ROSA-III実験装置が圧力等の条件を実炉と同一にしているのに、強度を保つために構造材には厚さの下限値が存在することと、幾何学的に相似なものは寸法が小さいものほど「表面積/体積」の値が大きくなるということによるものである。そこでこの影響を検討するためにケースSに用いられたノーディングから圧力容器構造材を模擬するヒートスラブを全て取り除いた計算を行い、これをケースHと呼ぶことにした。ケースHは構造材の熱容量を無視した計算であり、実炉の場合には単位流体容積当たりの構造材容積がROSA-IIIより小さいので、他の条件は相似的であるとすれば、実炉における構造材の熱容量の効果はケースSとHの間にあることになる。

ここで、ケースSにおける燃料棒から系内の流体に与えられた熱量（炉心伝熱量）と圧力容器壁から系内の流体に与えられた熱量とを比較して、Fig. 5.29に示す。ただしこの熱量（W）は、それぞれのヒートスラブの表面の熱流束（ W/m^2 ）とそのヒートスラブの伝熱面積（ m^2 ）との積の和として求められた。すなわち、

流体に与えられた熱量

$$= \sum \{ (\text{ヒートスラブ表面の熱流束})_i \times (\text{ヒートスラブの伝熱面積})_i \}$$

として求められた。ここで実線が燃料棒から系内流体への熱量； Q_1 を示し、白マルが圧力容器壁から系内流体への熱量； Q_2 を示す。破断直後は系内の流体の温度が高いため、系内の液体から圧力容器壁に熱が与えられて Q_2 は負の値を示すが、両者の温度関係が逆転すると熱の流れも変わり、破断後8秒からは圧力容器壁から系内に熱が流入するようになり Q_2 は正の値となる。その後も Q_2 は徐々に増加するが、一方 Q_1 は燃料棒ヒーターの出力曲線に従って9秒以降急減する。その結果、破断後70秒には Q_2 は Q_1 とほぼ同じになり（約 $5.5 \times 10^5 W$ ）、その後両者は同じ値を示しながら徐々に減少してゆく。ここで破断後0秒から100秒、100秒から200秒の間それぞれにおける Q_1 、 Q_2 の平均値を求めてみると、破断後0～100秒間では Q_1 の平均値が $1.27 \times 10^6 W$ であるのに対して Q_2 の平均値は $3.8 \times 10^5 W$ にすぎないが、100～200秒間では Q_1 の平均値は $4.8 \times 10^5 W$ 、 Q_2 の平均値は $4.5 \times 10^5 W$ と両者はほぼ等しくなることがわかった。これらのことから破断後長い時間がたつと、圧力容器壁の伝熱量は炉心の伝熱量とほぼ同等になり、系の熱水力的挙動に大きな影響を及ぼすことがわかる。ケースHでは、この圧力容器壁からの伝熱量の寄与がない。

Fig. 5.30にケースHにおける系圧力の実験結果をケースSの結果と比較して示す。ケースHの系圧力は破断後35秒まではケースSの結果とよく一致しているが、その後減圧が速くなりケースSの結果より小さくなる。しかし55秒以降ケースHの減圧速度はケースSと同じになり、それ以後ケースHの系圧力はつねにケースSより約280kPa小さい値を示して推移する。（ここでは図を示さないが）破断流量がケースSより小さいにもかかわらず、ケースHの系圧

力がケースSより低いのは、ケースHには圧力容器壁からの熱の流入がないためである。

Fig. 5.31にケースHにおけるダウンカマー部のボイド率の結果を示す。破線はケースSの結果である。ケースHの結果はいずれのボリュームにおいてもケースSの結果と同じか、ややボイド率が低くなっている。なおここで蓄積熱の放出の時間変化を検討するため、ケースSにおいてボリューム；C112(2)、C130に接するヒートスラブの各メッシュ・ポイントの温度を各時刻ごとに調べたところ、(1)ヒートスラブの各メッシュ・ポイントとボリューム内流体との温度相対関係は破断後150秒以後ほぼ固定し、外壁部が一番高くなる。そして時間がたつにつれて、各点の相対的關係はそのままで全体の温度が下がってゆく(2)ダウンカマーに接するヒートスラブのメッシュ・ポイントの温度勾配が100～150秒以降次第に減少してゆくことがわかった。これより蓄積熱の放出速度は破断後約100秒に最大になり、その後徐々に減少してゆくことがわかる(Fig. 5.29からもこのことがわかる)。よって、ケースHとSとでボイド率にあまり差がないのは、ケースHでは壁熱の流入がないが、反面系圧力の低下速度がケースSに比べて大きいので、減圧沸騰による気泡生成速度が大きくなる効果が生じるからと考えることができる。

このことは、ECCS起動信号であり主蒸気管破断事故のとき非常に重要である上部ダウンカマー水位にも言える。Fig. 5.32にケースHの上部ダウンカマー水位を黒マルで示す。ここで実線は実験結果であり、白マルはケースSと非常によく一致しているが、その後徐々に差が開き160～180秒では数cm～十数cm程度ケースSより大きい値を示して推移する。これはケースHのダウンカマー部の残存水量がケースSより多いためで、ケースHの破断流量は破断後28秒まではケースSとほぼ同じ値を示すが、40秒以降ケースSより0.15～0.23 kg/s 小さい値を示す。これらのことから考えると、RELAP5/MOD1による解析でみるかぎり、上部ダウンカマー水位により生じるECCS起動信号の時刻は構造材の蓄積熱によって大幅に変わることはないと言える。

Fig. 5.33にチャンネルAのボイド率を示す。破線はケースSの結果である。ケースHのボイド率はケースSと比較するとポジション4を除いて非常によく一致しているが、全体的にケースSよりやや低い。これはケースHのダウンカマーヘッドがやや大きいため、炉心流量がケースSと比べると若干多く、また変動もやや大きいことによるものである。このため、ケースSの炉心部ボイド率は破断後175秒以降各ポジションで1.0になるのに対し、ケースHではポジション4より下ではまだ1.0にはならない。

Figs. 5.34から5.40にA11ロッドの表面温度を各ポジション別に示す。ケースHのボイド率がケースSよりやや低いことに対応して、ケースHの燃料棒表面温度はケースSの結果より低い値を示している。

以上のことから、圧力容器壁のヒートスラブを全部除いたケースHでは(1)圧力容器壁からの熱の流入がないため系圧力はケースSに比べて低くなり、破断流量の低下・残存水量の減少速度の低下がみられる(2)ダウンカマーでは、圧力容器壁からの熱の流入がなくなって発泡を抑える効果と減圧速度が速いことによる発泡を促す効果とが相殺しあうため、ケースHのボイド率はケースSとほぼ同じか若干小さい程度にとどまった(3)炉心部では、炉心流量が若干多いだけケースHのボイド率・燃料棒表面温度はケースSよりやや低くなり、炉心はよく冷却されたことがわかる。なお、ケースHのダウンカマー部・コアシュラウド内の差圧はケースSと定性的

に一致していたが、ダウンカマー部で最大 5 kPa, コアシュラウド内で 2 kPa ケース Hの方が大きかった。これはケース Hの方が残存水量が多かったことを示している。

ROSA-III RUN952 ANALYSIS-RESULTS

Exp.Data Case D

□ I FM 72 ○ I R JWJ76

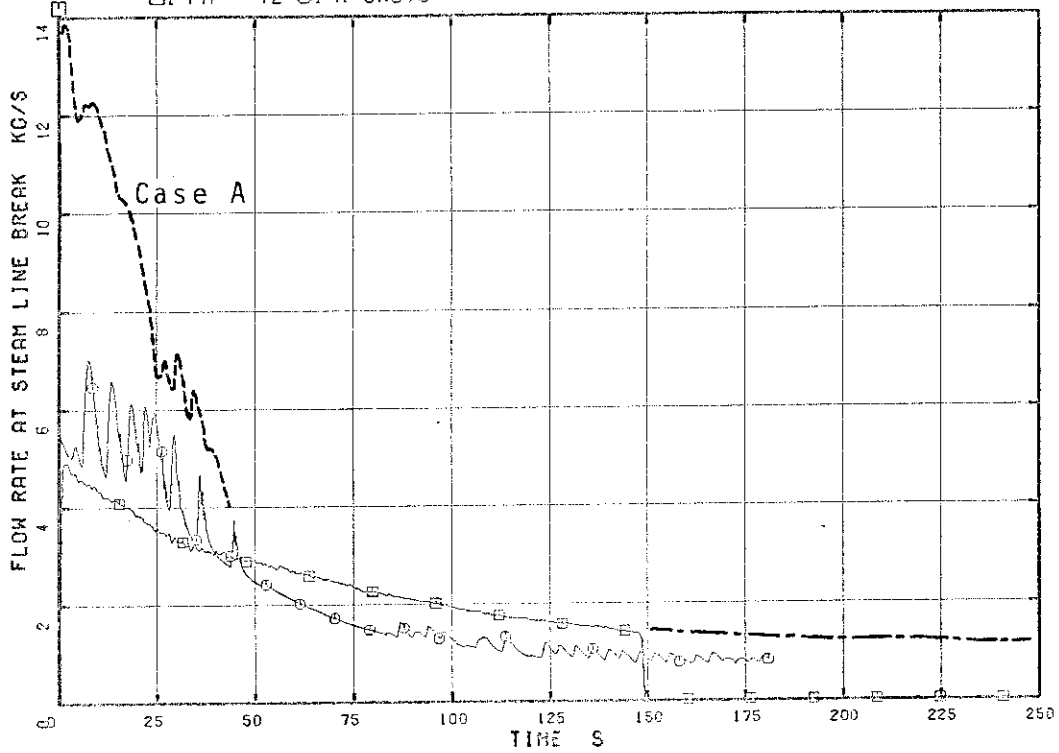


Fig. 5.1 Effect of discharge coefficient on the steam discharge flow rate (Cases A and D)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

Exp.Data Case S Case D

□ I PA 1 ○ I R APV2 ▲ 2 R APV2

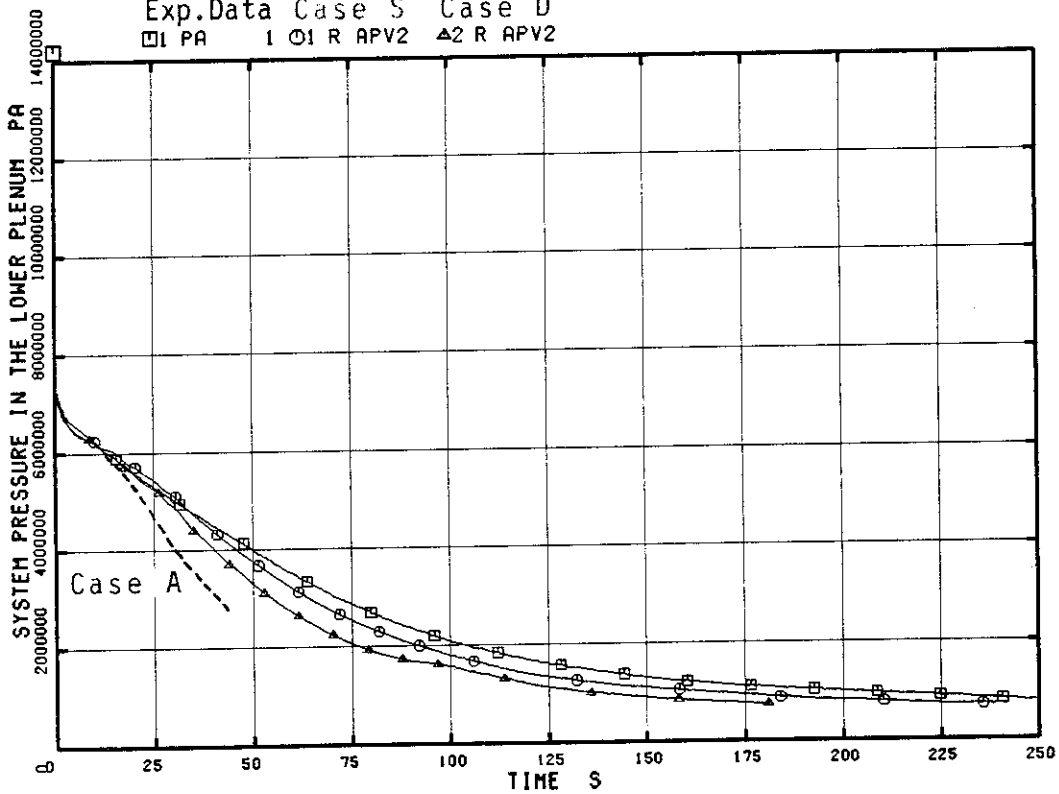


Fig. 5.2 Effect of discharge coefficient on the lower plenum pressure (Cases A, S and D)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS-RESULTS

Case D
 □ I R APV24

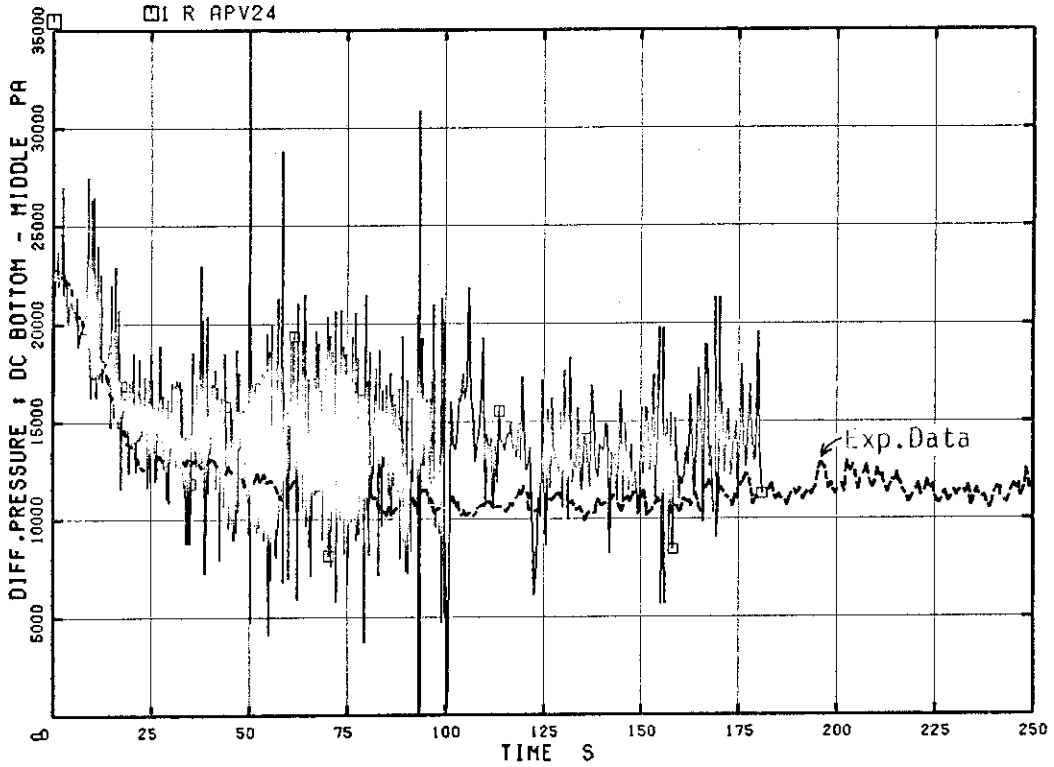


Fig. 5.3 Calculated differential pressure across the lower downcomer (Case D)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS-RESULTS

Case D
 □ I R APV25

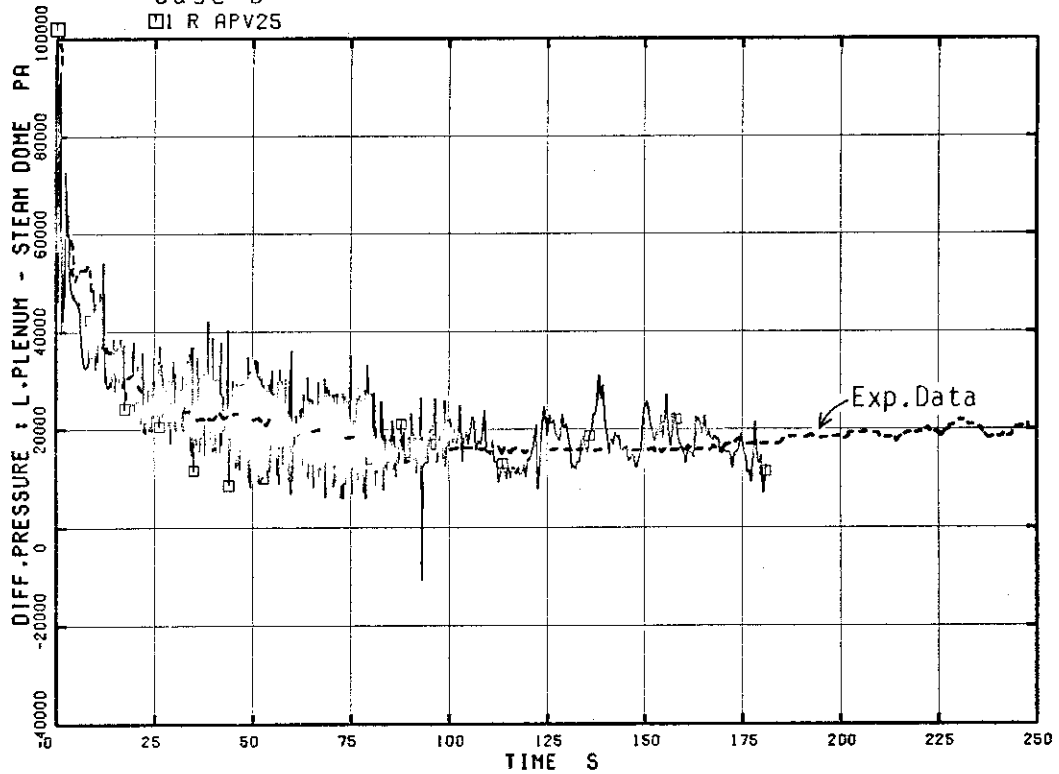


Fig. 5.4 Calculated differential pressure between the lower plenum and steam dome

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

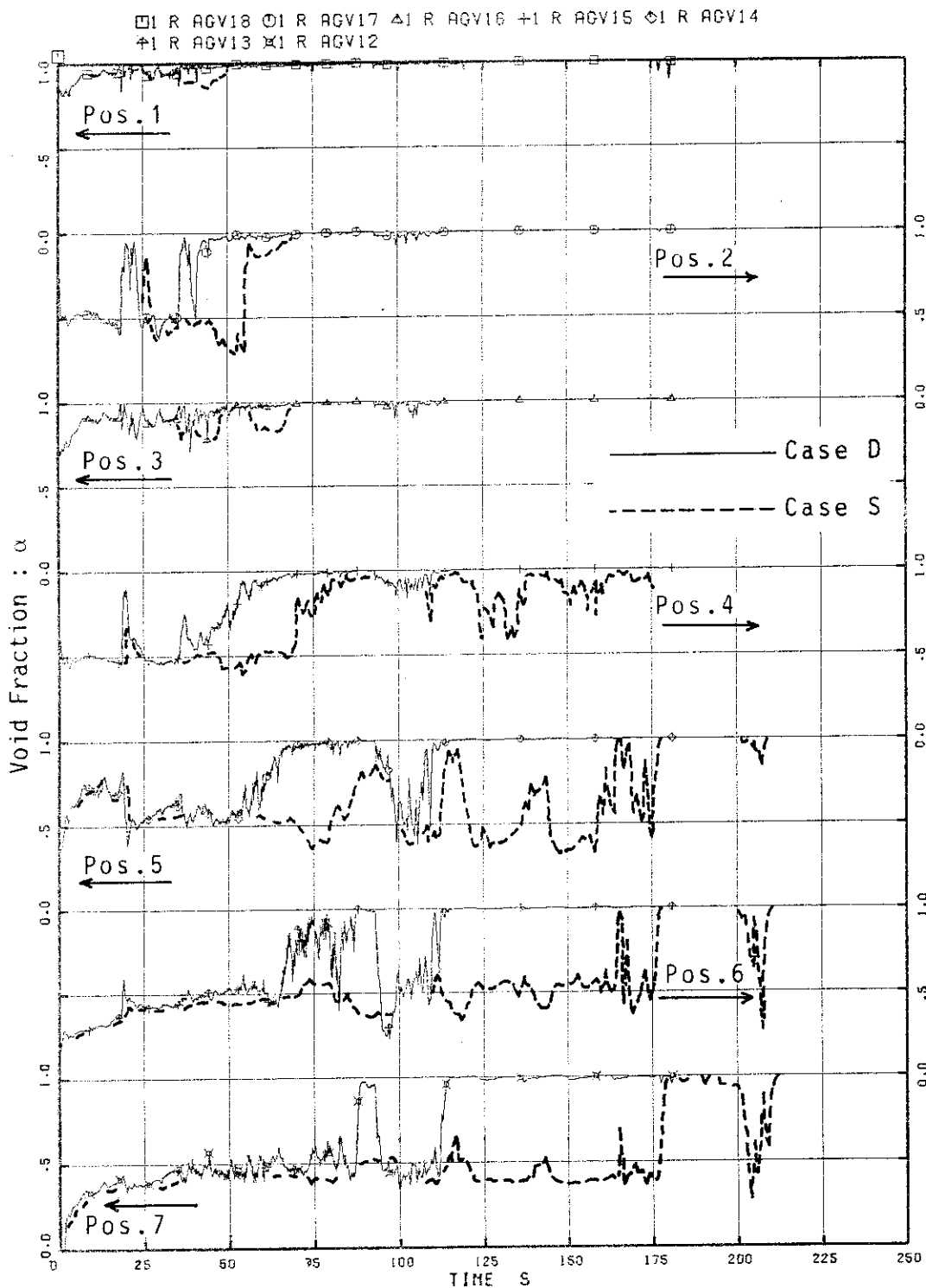


Fig. 5.5 Effect of discharge coefficient on the void fraction in the high-power channel (Cases S and D)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

Exp.Data Case S Case D

□ I TE 201 ○ I R TPS14 ▲ 2 R TPS14

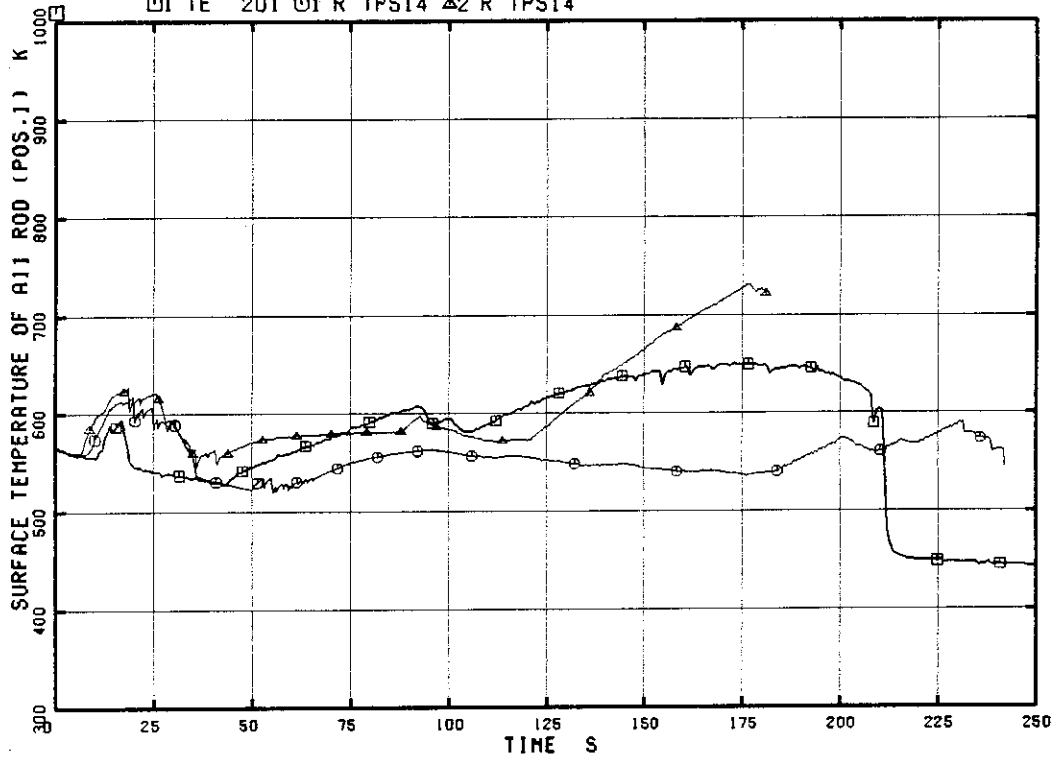


Fig. 5.6 Effect of discharge coefficient on the fuel surface temperature at Position 1 of high-power channel (Cases S and D)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

Exp.Data Case S Case D

□ I TE 202 ○ I R TPS13 ▲ 2 R TPS13

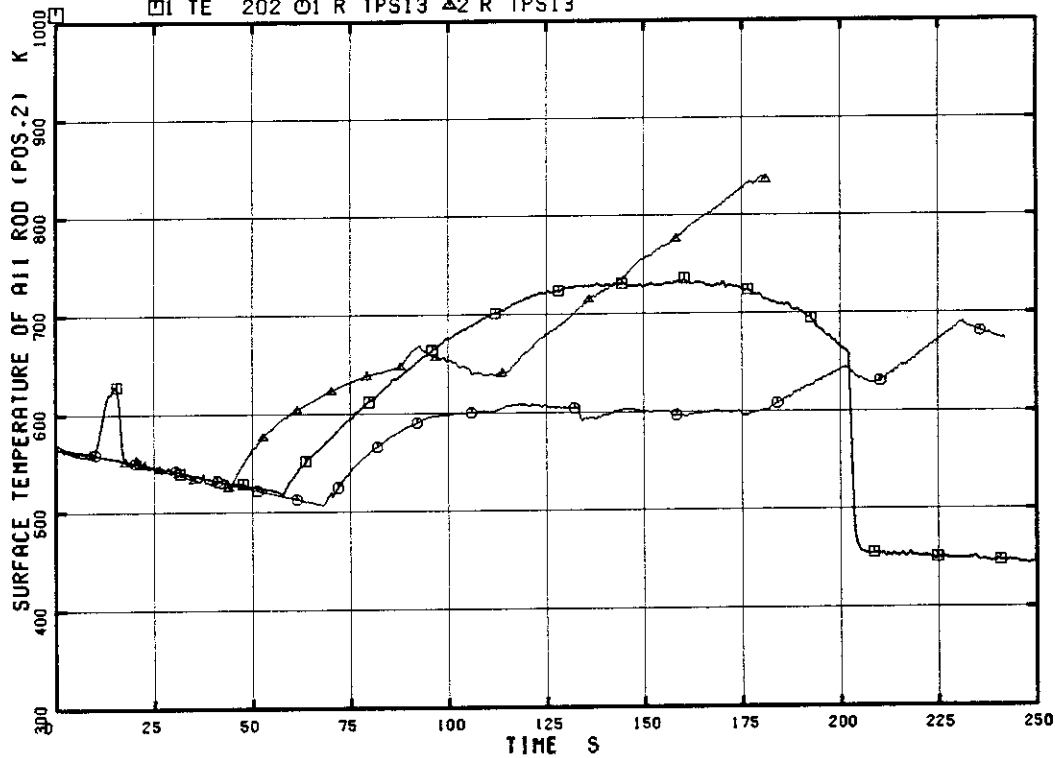


Fig. 5.7 Effect of discharge coefficient on the fuel surface temperature at Position 2 of high-power channel (Cases S and D)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

Exp.Data Case S Case D

□ TE 203 ○ R TPS12 ▲ R TPS12

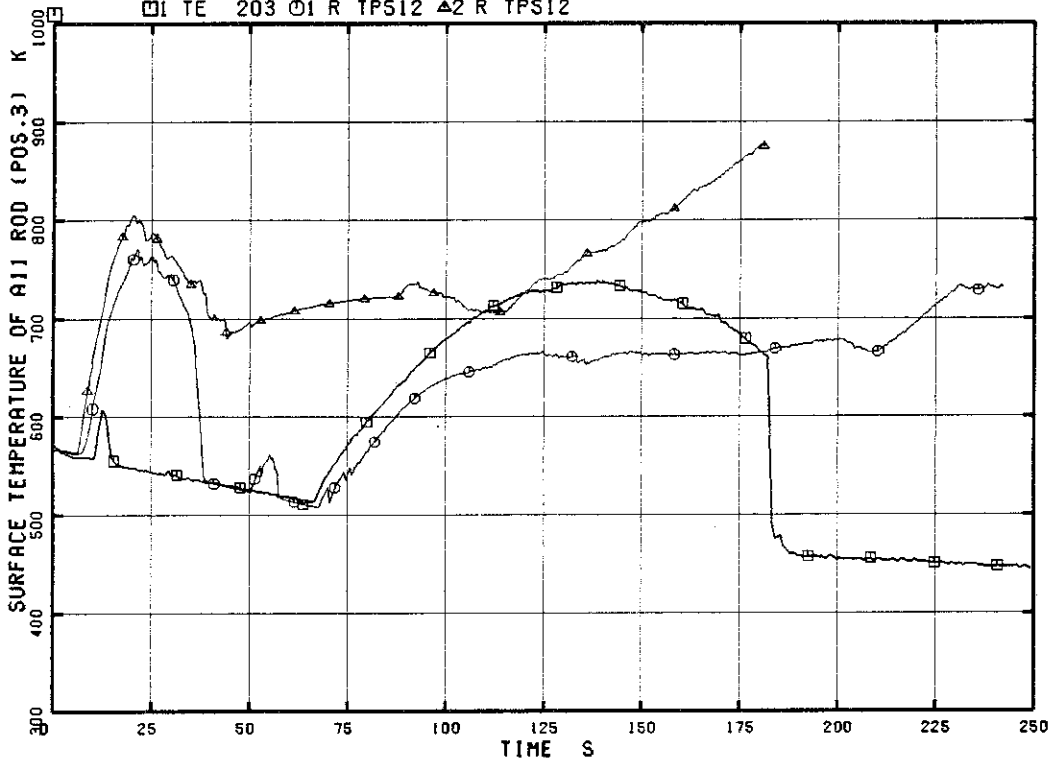


Fig. 5.8 Effect of discharge coefficient on the fuel surface temperature at Position 3 of high-power channel (Cases S and D)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

Exp.Data Case S Case D

□ TE 204 ○ R TPS11 ▲ R TPS11

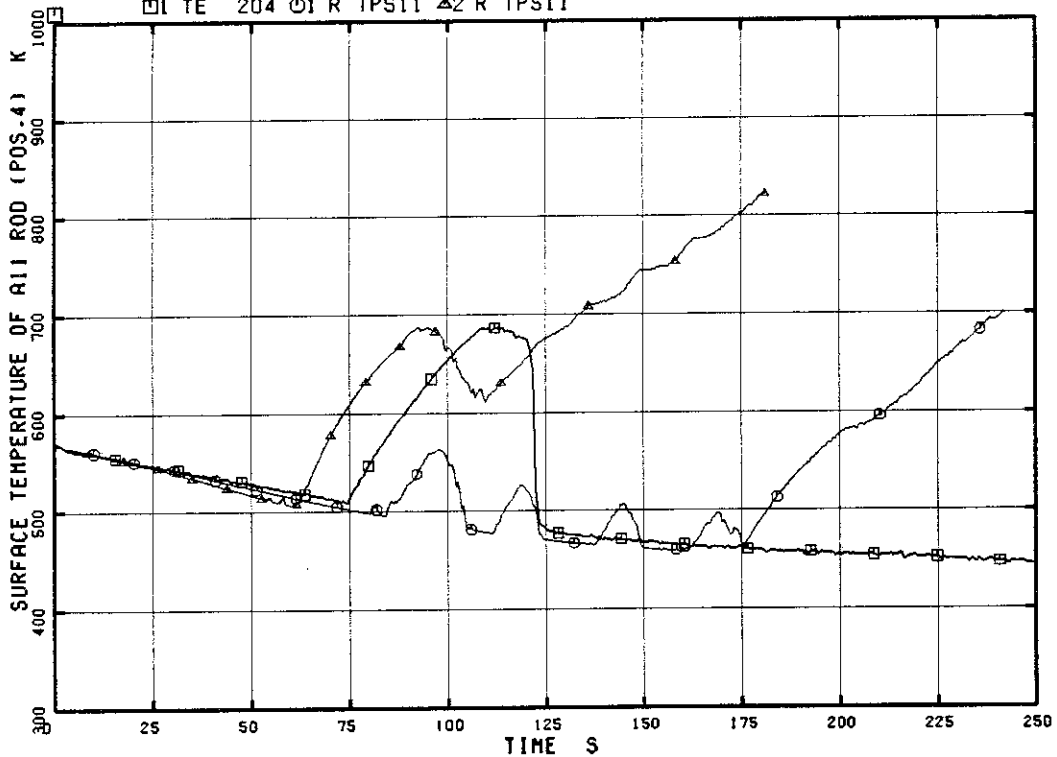


Fig. 5.9 Effect of discharge coefficient on the fuel surface temperature at Position 4 of high-power channel (Cases S and D)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

Exp.Data Case S Case D

□ 1 TE 205 ○ 1 R TPS10 ▲ 2 R TPS10

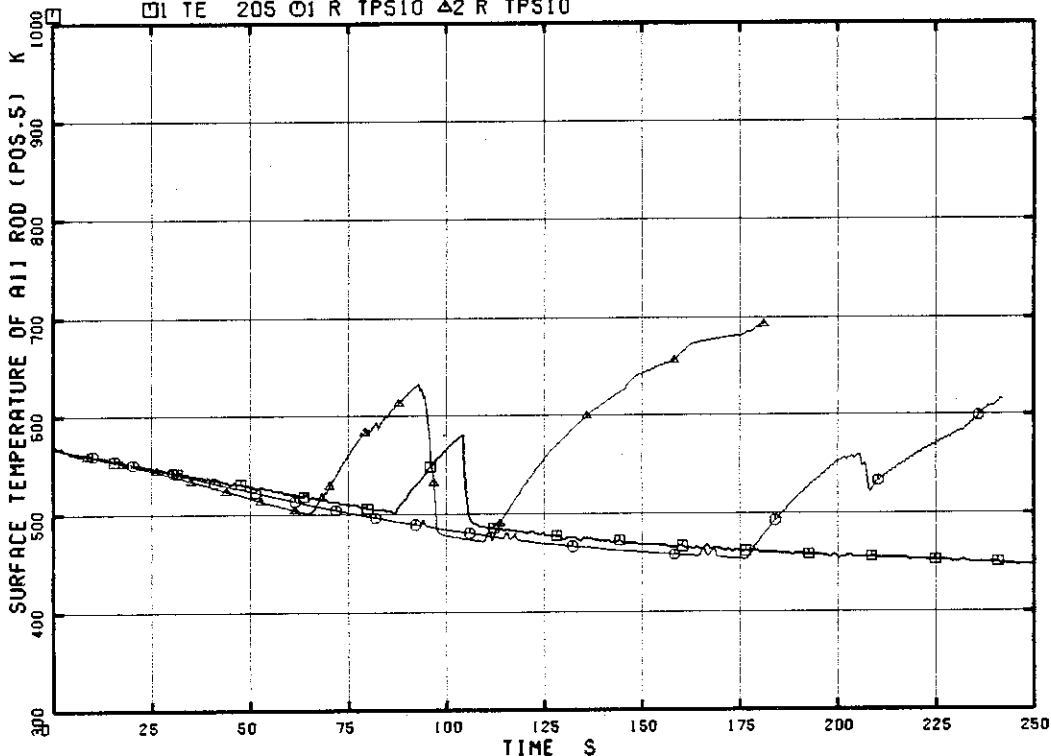


Fig. 5.10 Effect of discharge coefficient on the fuel surface temperature at Position 5 of high-power channel (Cases S and D)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

Exp.Data Case S Case D

□ 1 TE 206 ○ 1 R TPS9 ▲ 2 R TPS9

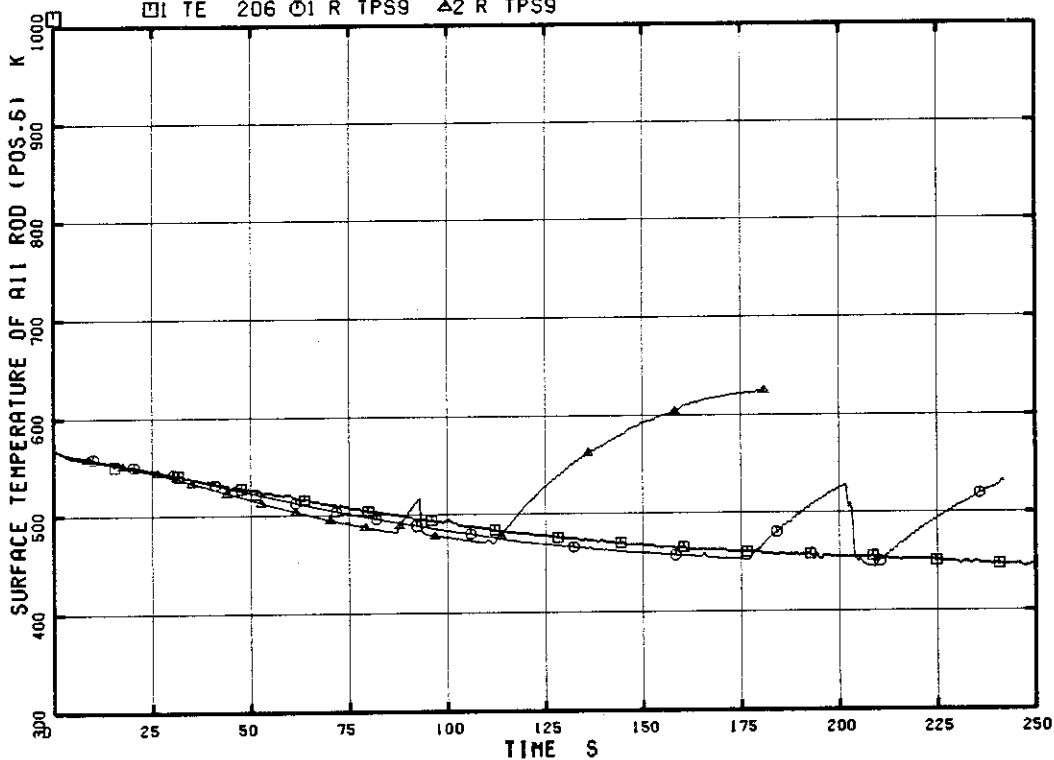


Fig. 5.11 Effect of discharge coefficient on the fuel surface temperature at Position 6 of high-power channel (Cases S and D)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

Exp.Data Case S Case D

□ TE 207 ○ R TPS8 △ R TPS8

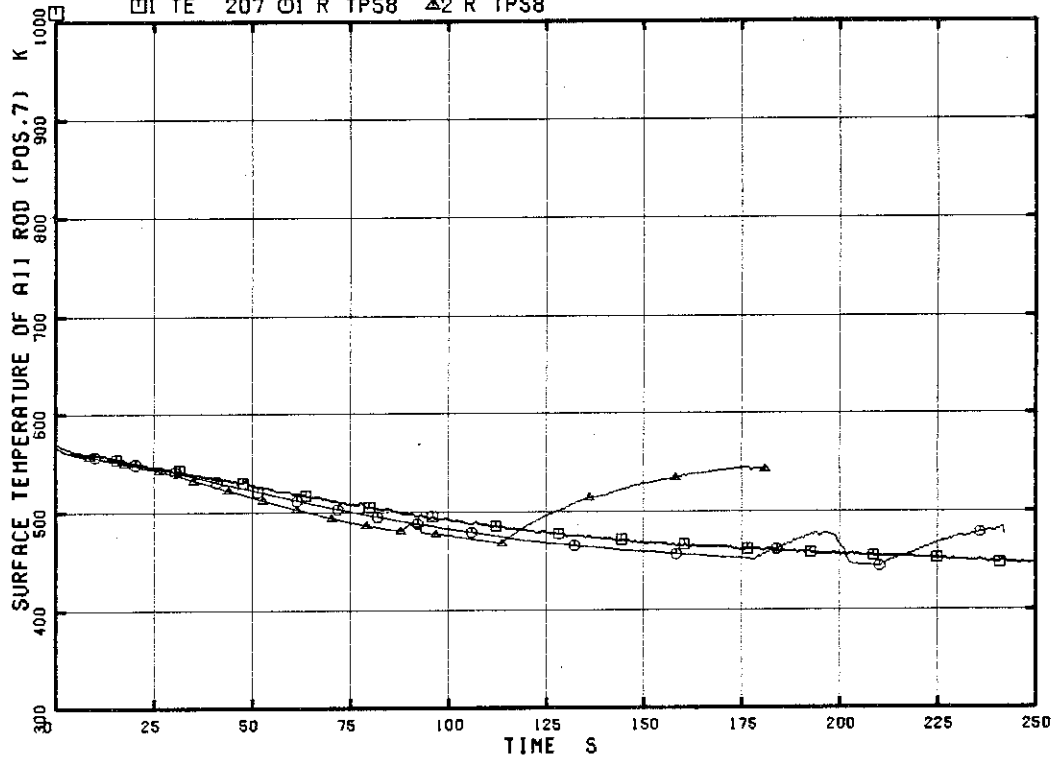


Fig. 5.12 Effect of discharge coefficient on the fuel surface temperature at Position 7 of high-power channel (Cases S and D)

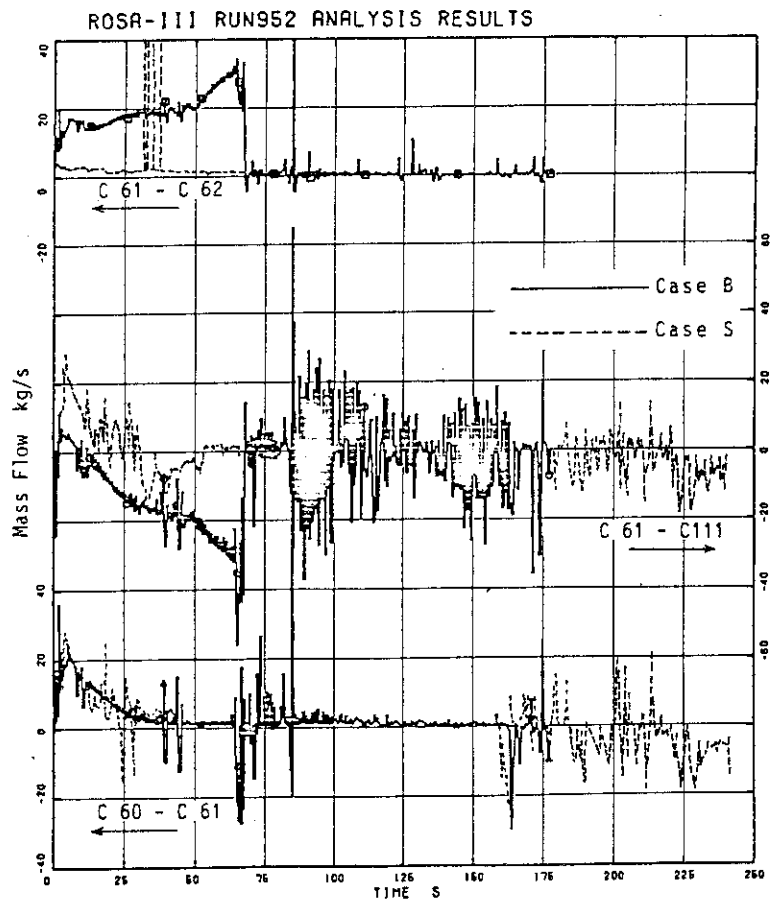


Fig. 5.13 Effect of separator model on flow rates through the separator (Cases S and B)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

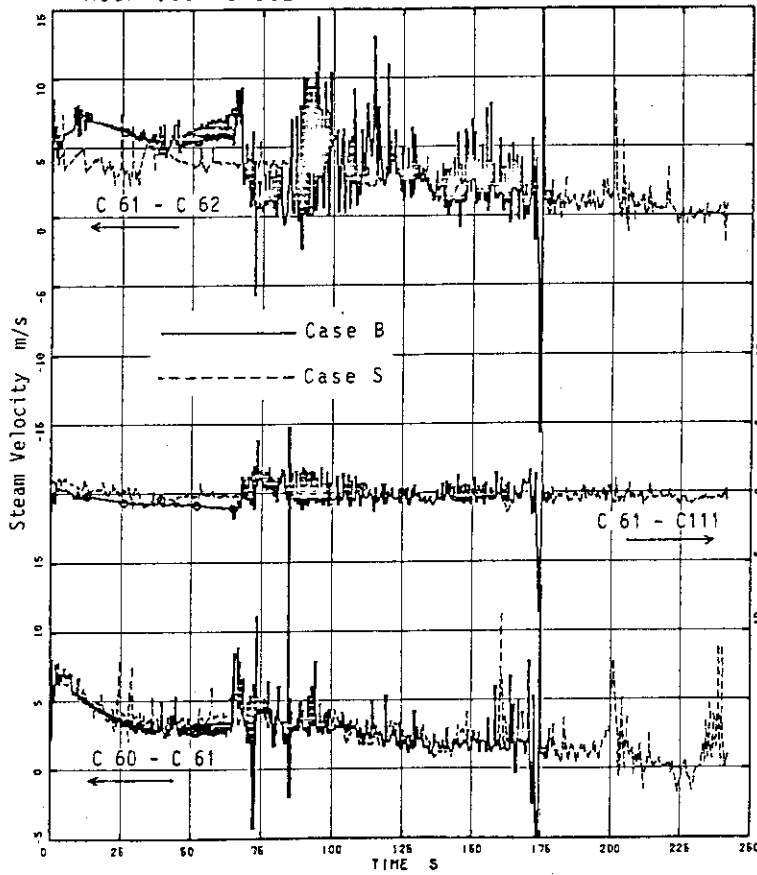


Fig. 5.14 Effect of separator model on steam velocities through the separator (Cases S and B)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

Exp. Data Case S Case B
 □ I FM 72 ○ I R JWJ76 ▲ R JWJ76

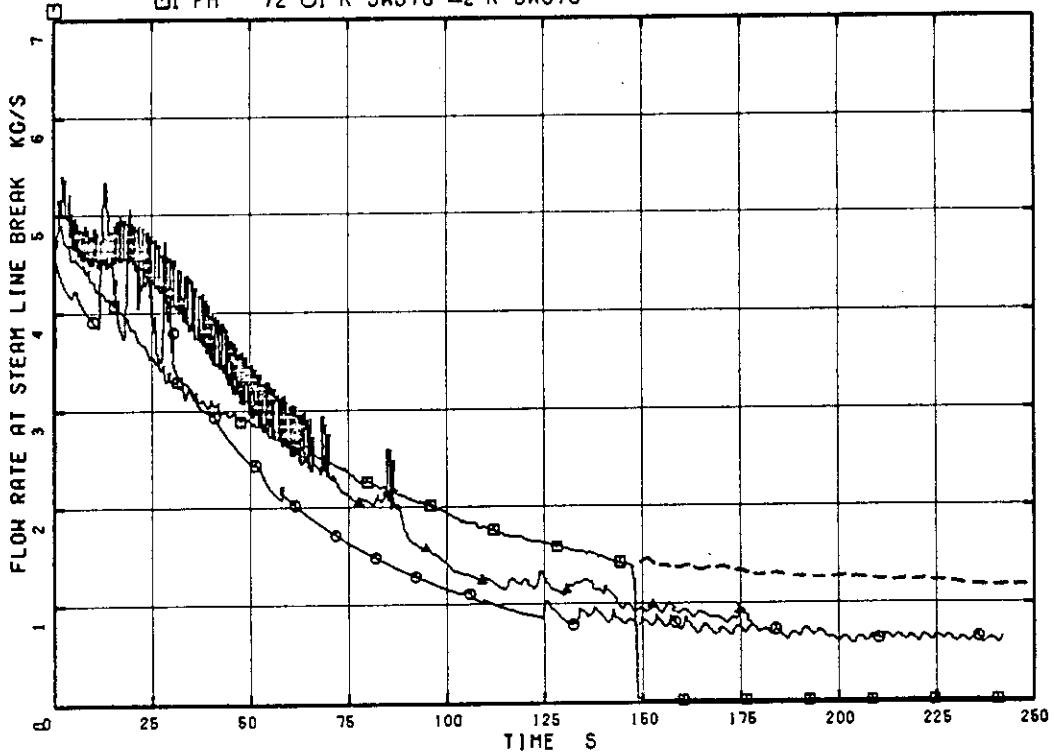


Fig. 5.15 Effect of separator model on steam discharge flow rate (Cases S and B)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

Case B
 □ I R QEV68

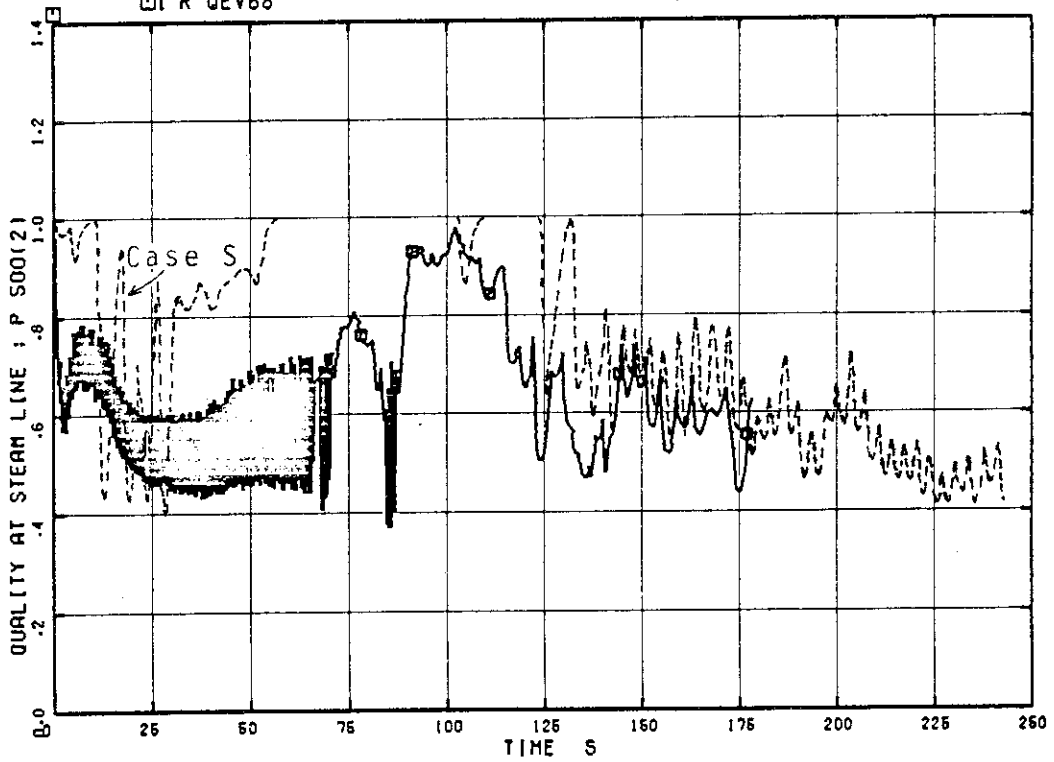


Fig. 5.16 Effect of separator model on fluid quality upstream the break (Cases S and B)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

Exp.Data Case S Case B
 □ I PA ○ I R APV2 ▲ 2 R APV2

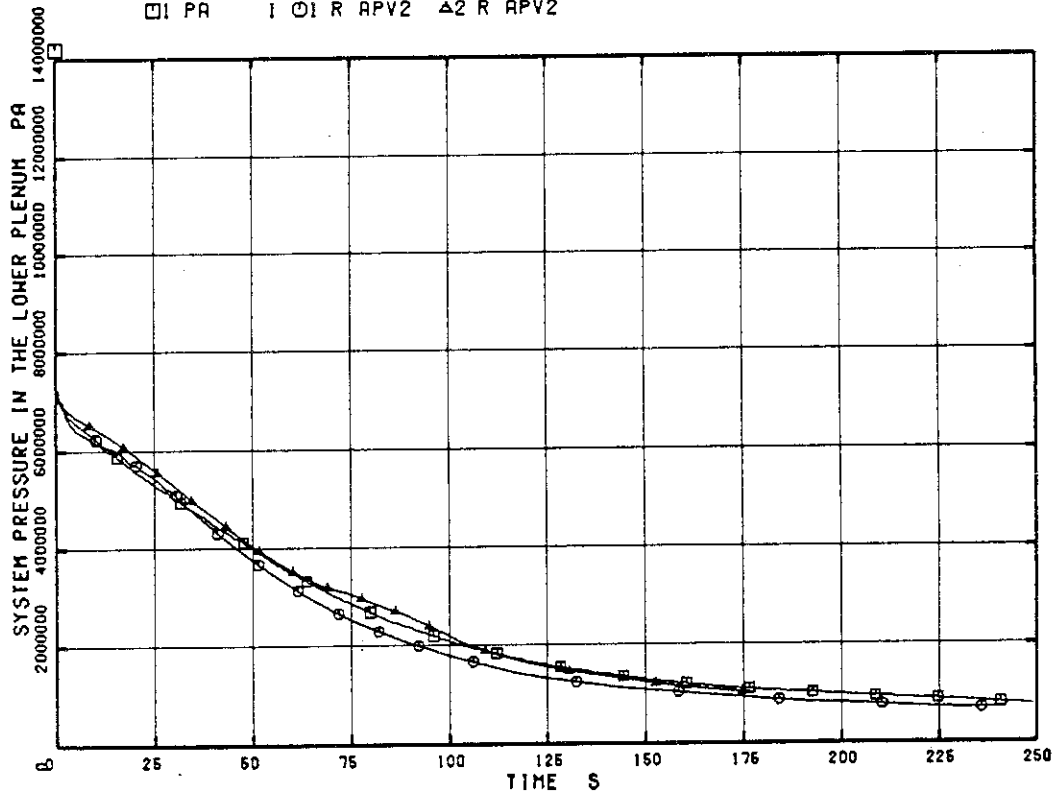


Fig. 5.17 Effect of separator model on lower plenum pressure (Cases S and B)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

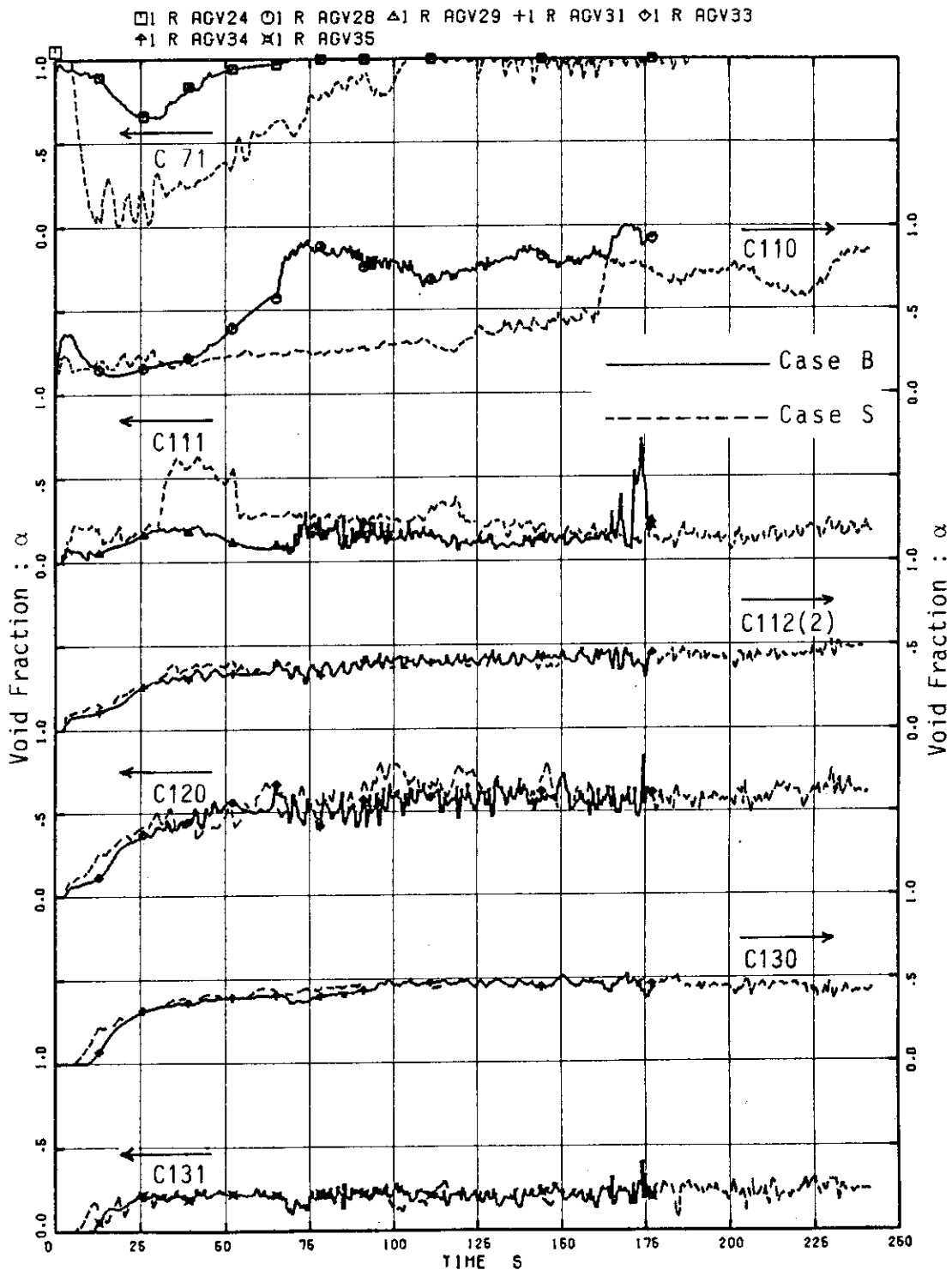


Fig. 5.18 Effect of separator model on void fraction in the downcomer (Cases S and B)

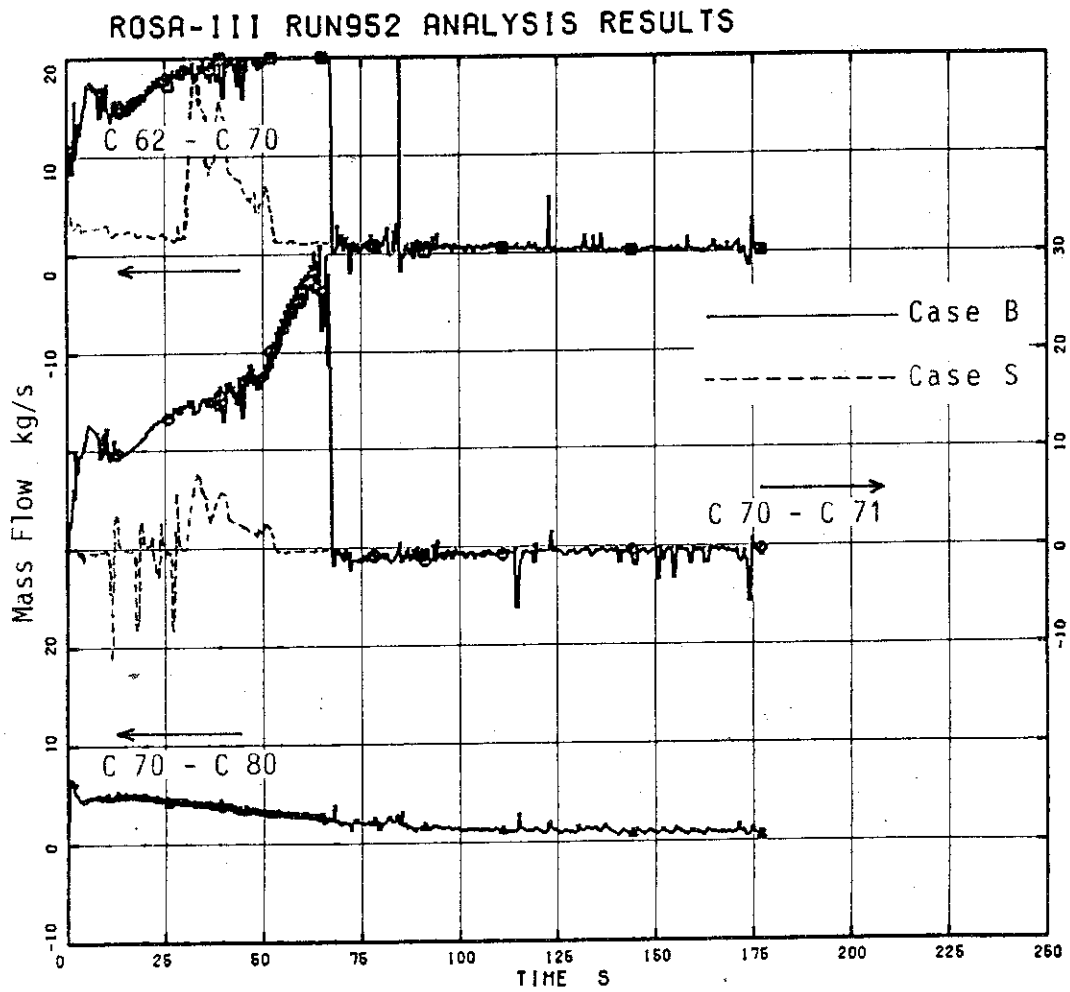


Fig. 5.19 Effect of separator model on flow rates at the steam dome (Cases S and B)

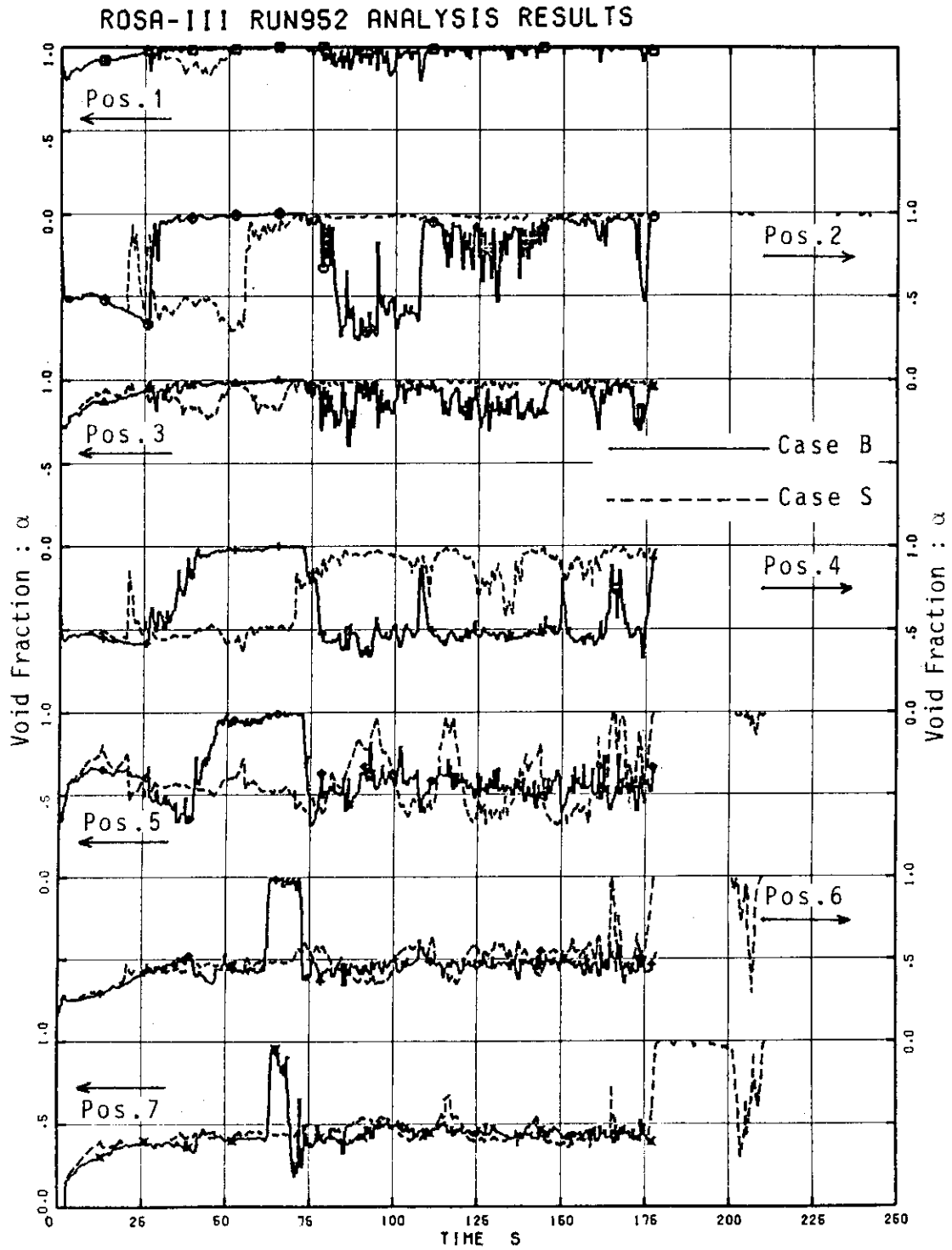


Fig. 5.20 Effect of separator model on void fraction in the high-power channel (Cases S and B)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

Exp.Data Case S Case B

□ I TE 201 ○ I R TPS14 ▲ R TPS14

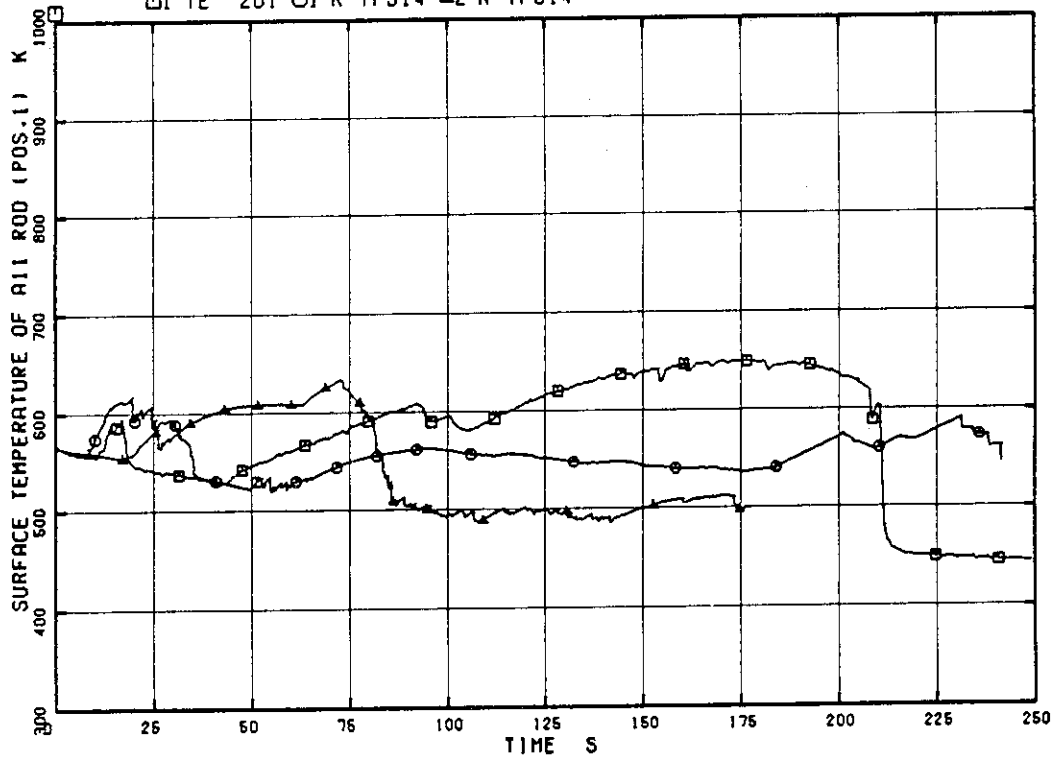


Fig. 5.21 Effect of separator model on fuel surface temperature at Position 1 of high-power channel (Cases S and B)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

Exp.Data Case S Case B

□ I TE 202 ○ I R TPS13 ▲ R TPS13

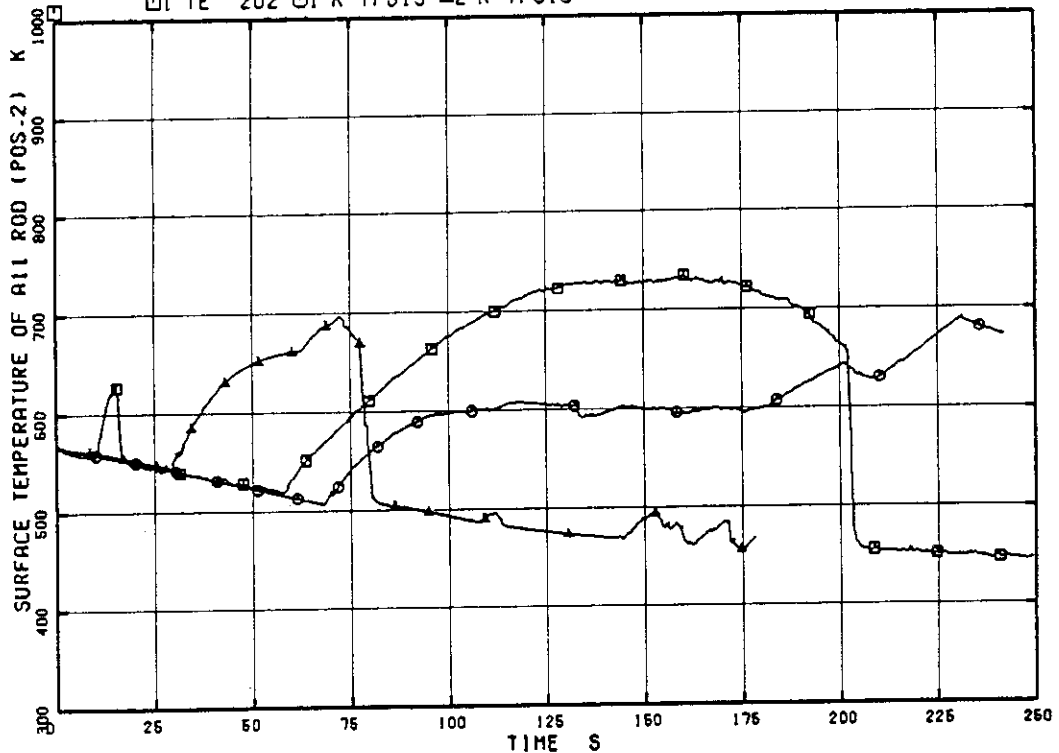


Fig. 5.22 Effect of separator model on fuel surface temperature at Position 2 of high-power channel (Cases S and B)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

Exp.Data Case S Case B

□ TE 203 ○ R TPS12 ▲ R TPS12

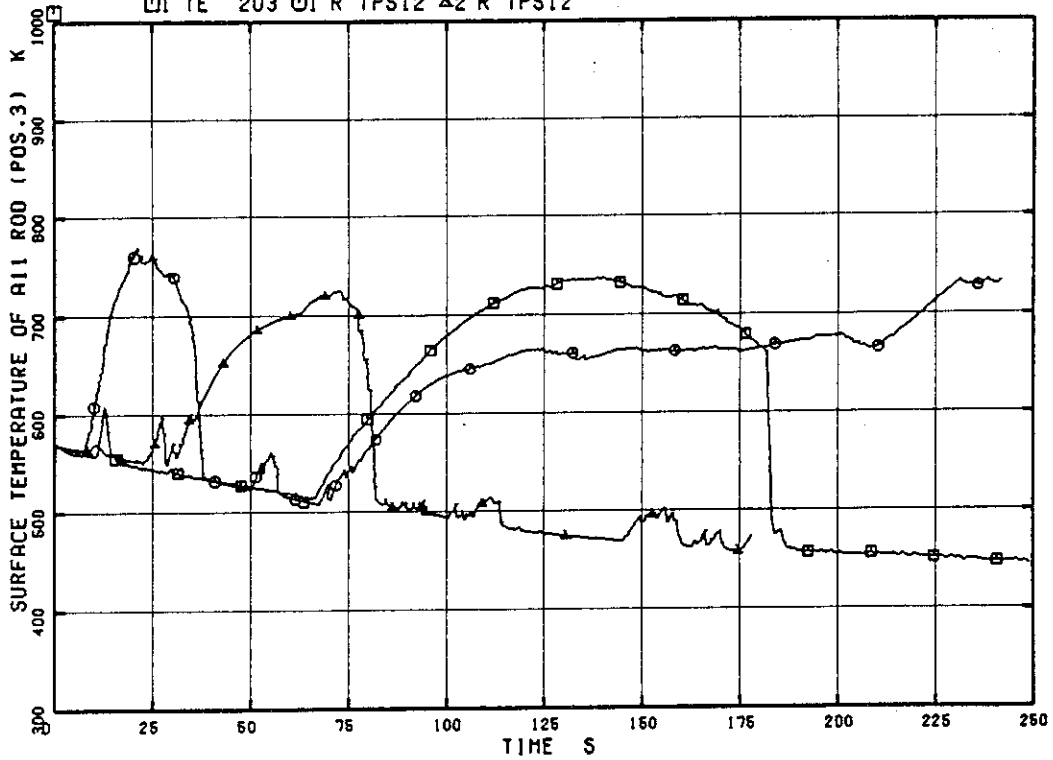


Fig. 5.23 Effect of separator model on fuel surface temperature at Position 3 of high-power channel (Cases S and B)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

Exp.Data Case S Case B

□ TE 204 ○ R TPS11 ▲ R TPS11

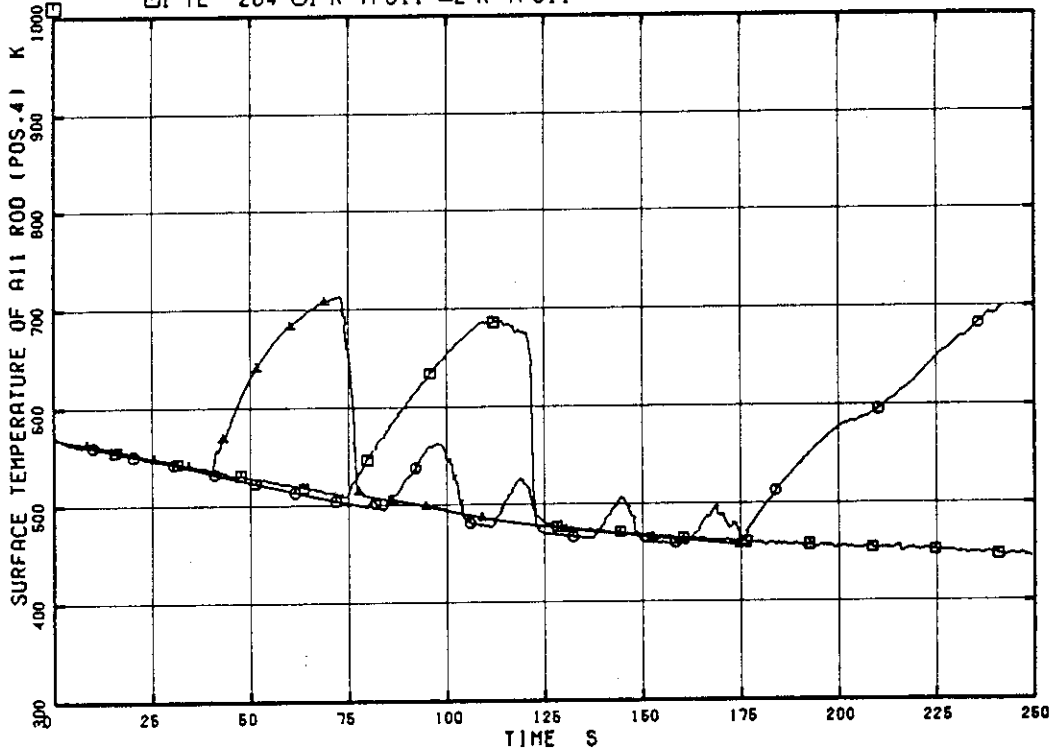


Fig. 5.24 Effect of separator model on fuel surface temperature at Position 4 of high-power channel (Cases S and B)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

Exp.Data Case S Case B
 □ TE 205 ○ R TPS10 ▲ 2 R TPS10

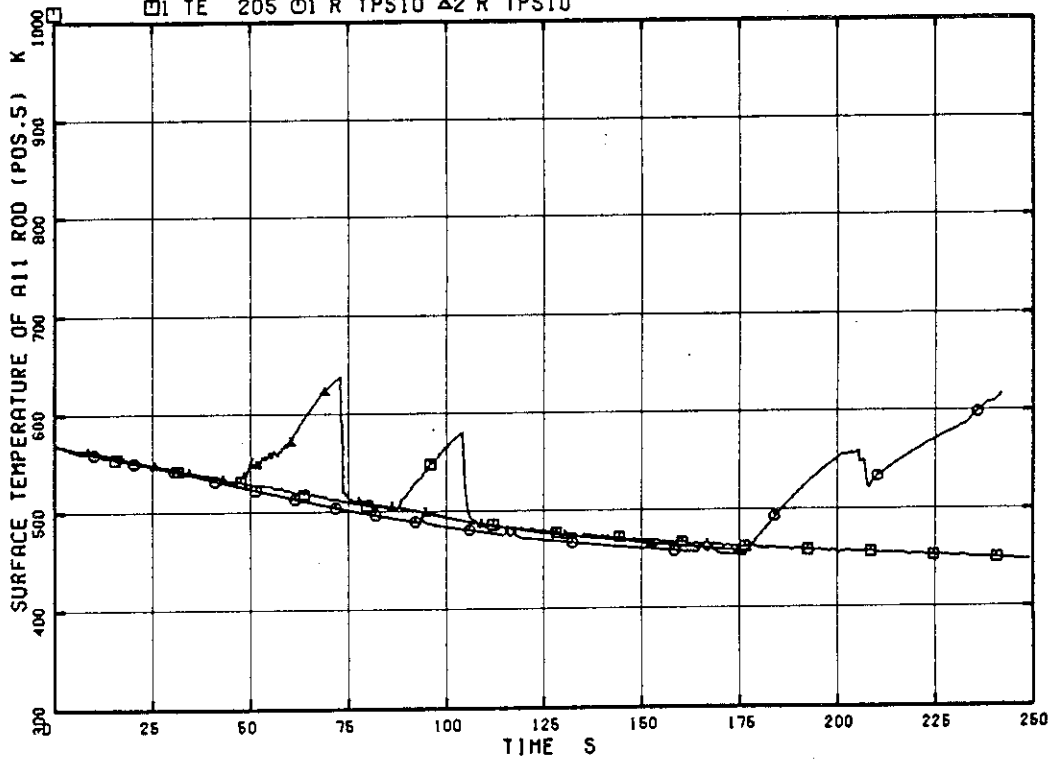


Fig. 5.25 Effect of separator model on fuel surface temperature at Position 5 of high-power channel (Cases S and B)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

Exp.Data Case S Case B
 □ TE 206 ○ R TPS9 ▲ 2 R TPS9

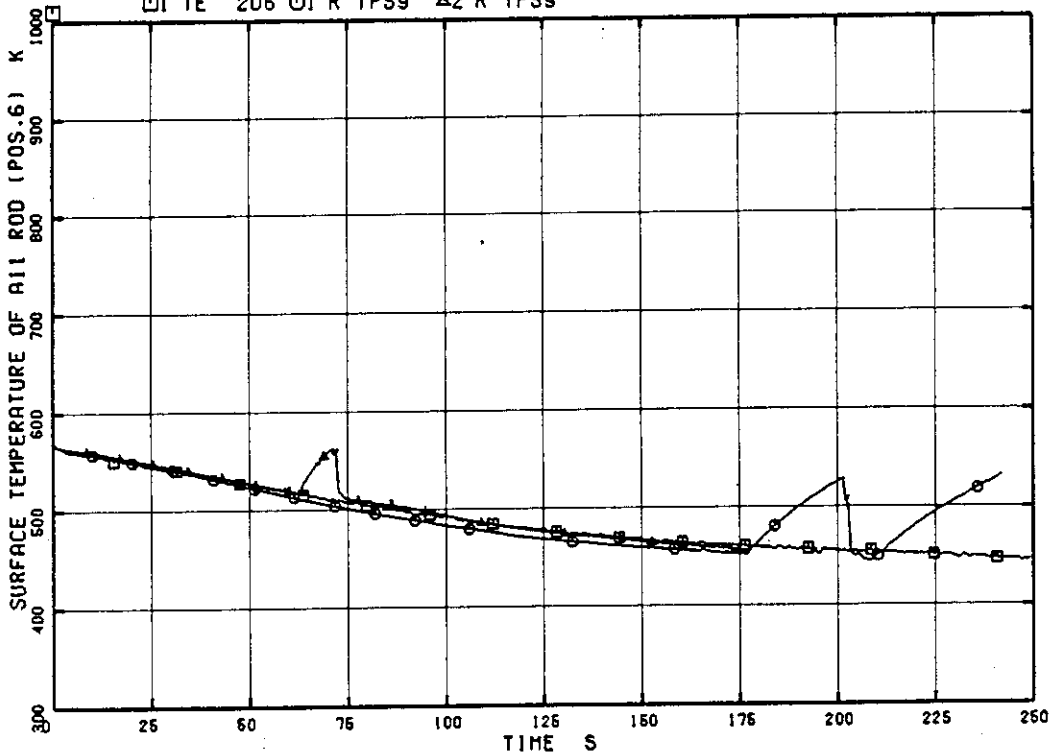


Fig. 5.26 Effect of separator model on fuel surface temperature at Position 6 of high-power channel (Cases S and B)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

Exp.Data Case S Case B
 □ TE 207 ○ I R TPS8 △ 2 R TPS8

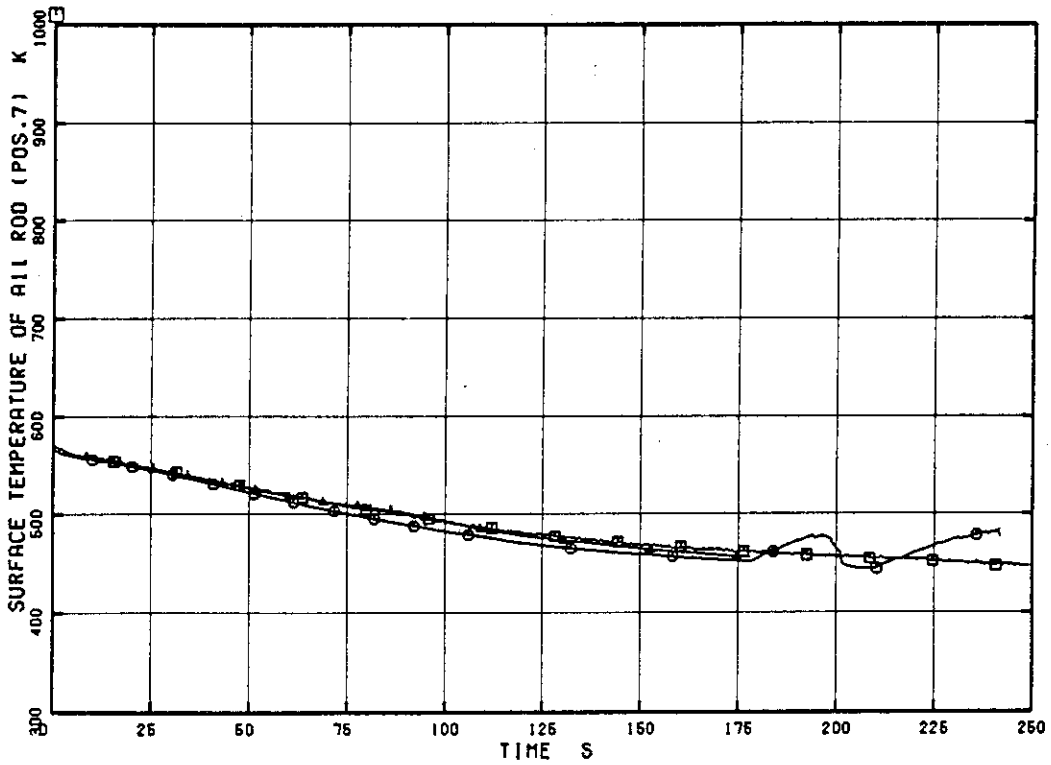


Fig. 5.27 Effect of separator model on fuel surface temperature at Position 7 of high-power channel (Cases S and B)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

Case B
 □ I R JHJ24

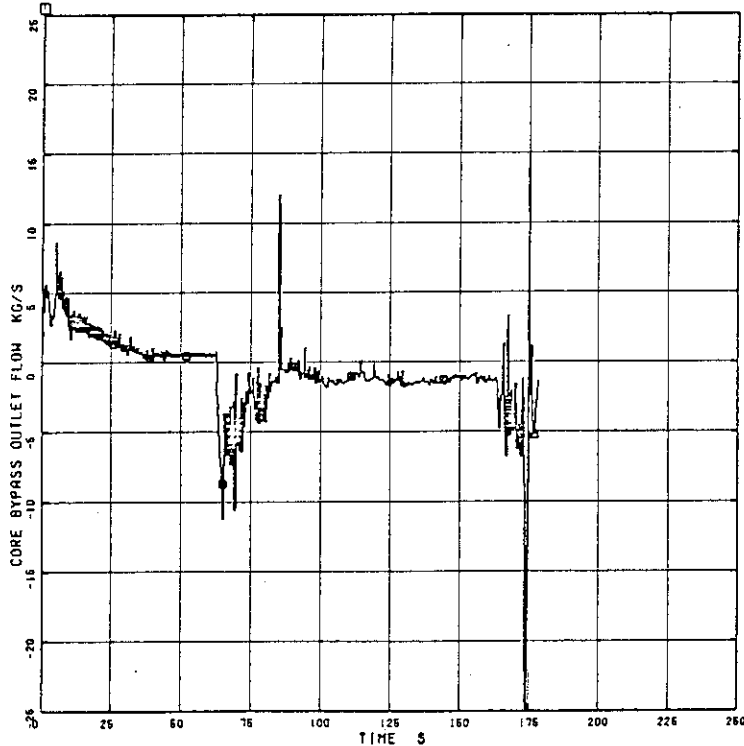


Fig. 5.28 Calculated flow rate at the exit of core-bypass (Case B)

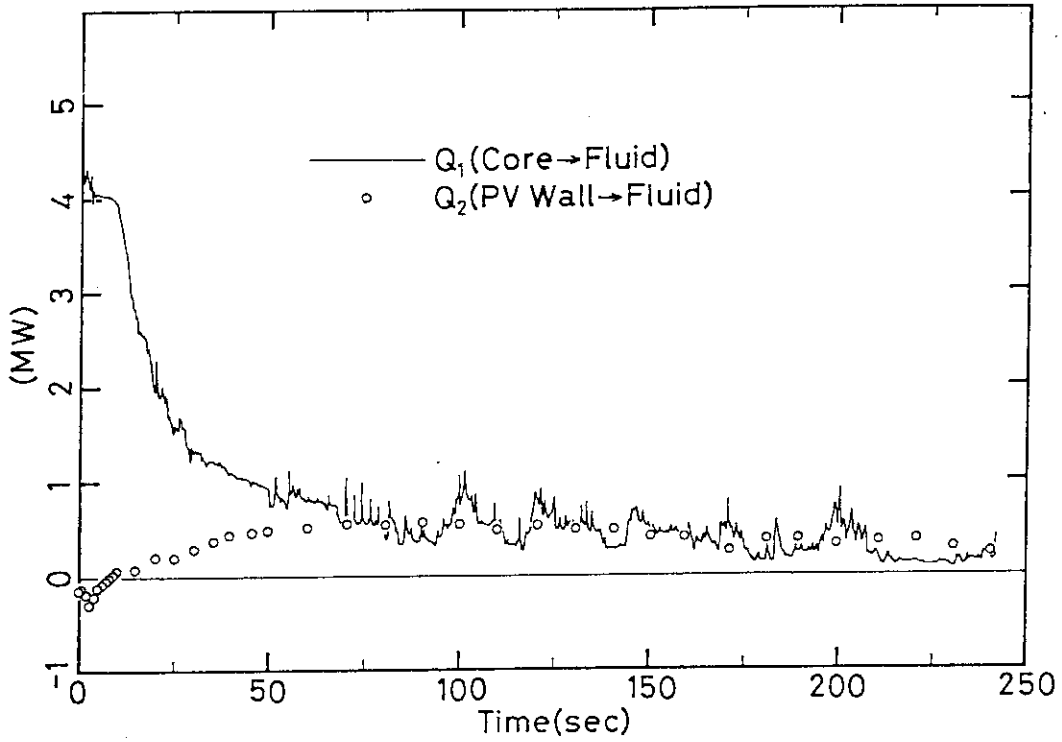


Fig. 5.29 Calculated heat release rates into coolant from fuel rods and pressure vessel wall (Case S)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

Exp. Data Case S Case H
 □ 1 PA 1 ○ 1 R APV2 △ 2 R APV2

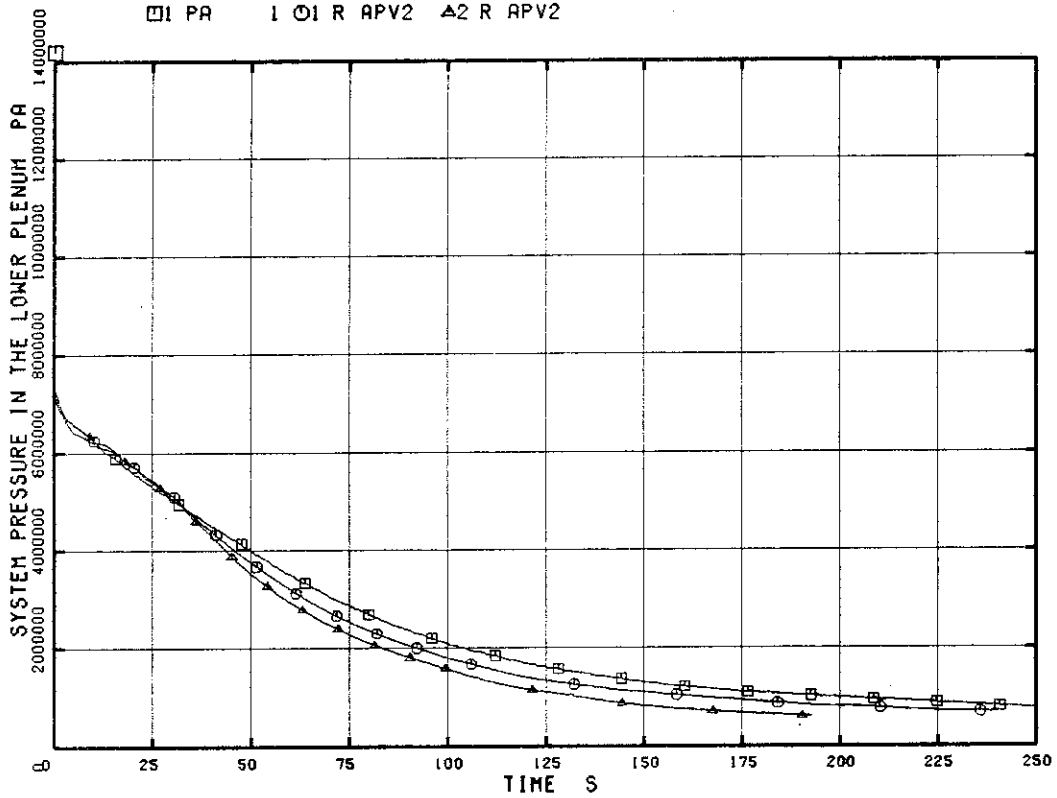


Fig. 5.30 Effect of wall stored heat on pressure (Cases S and H)

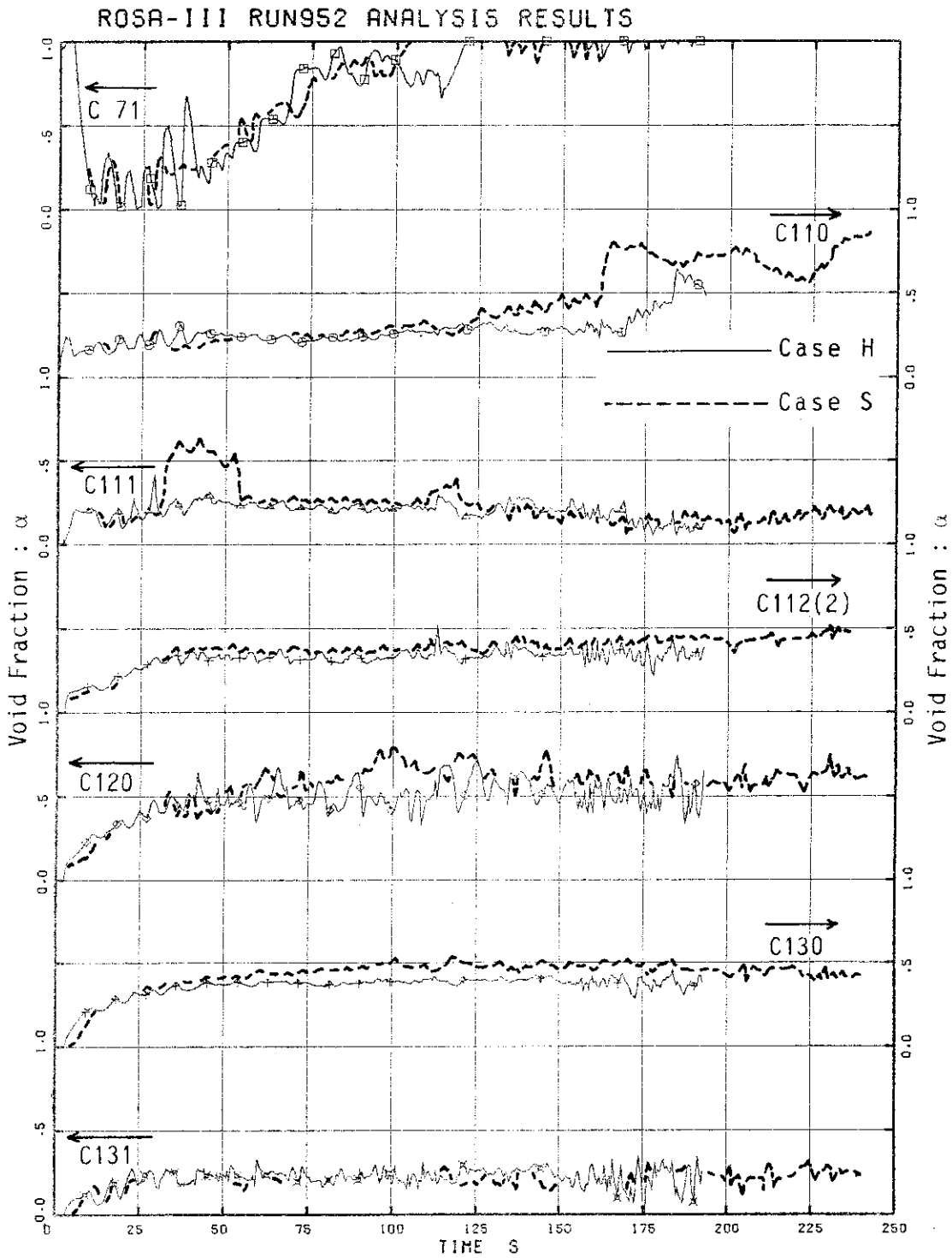


Fig. 5.31 Effect of wall stored heat on void fraction in the downcomer (Cases S and H)

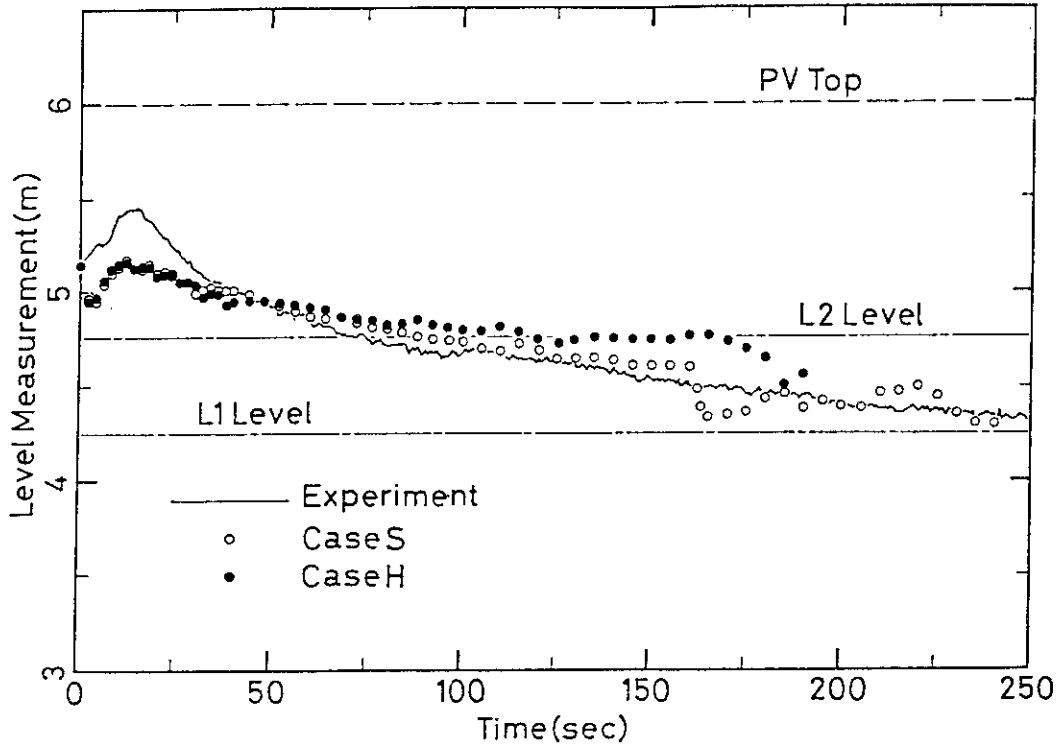


Fig. 5.32 Effect of wall stored heat on upper downcomer water level (Cases S and H)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

Exp.Data Case S Case H
 □ TE 201 ○ R TPS14 △ 2 R TPS14

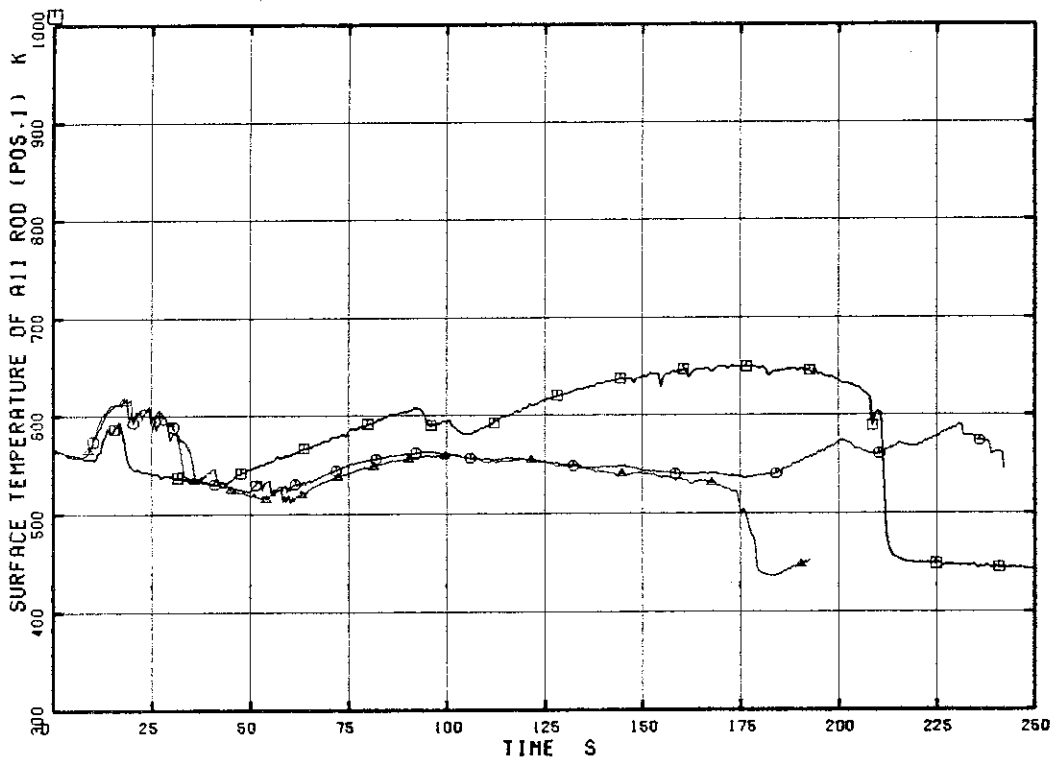


Fig. 5.34 Effect of wall stored heat on fuel surface temperature at Position 1 of high-power channel (Cases S and H)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

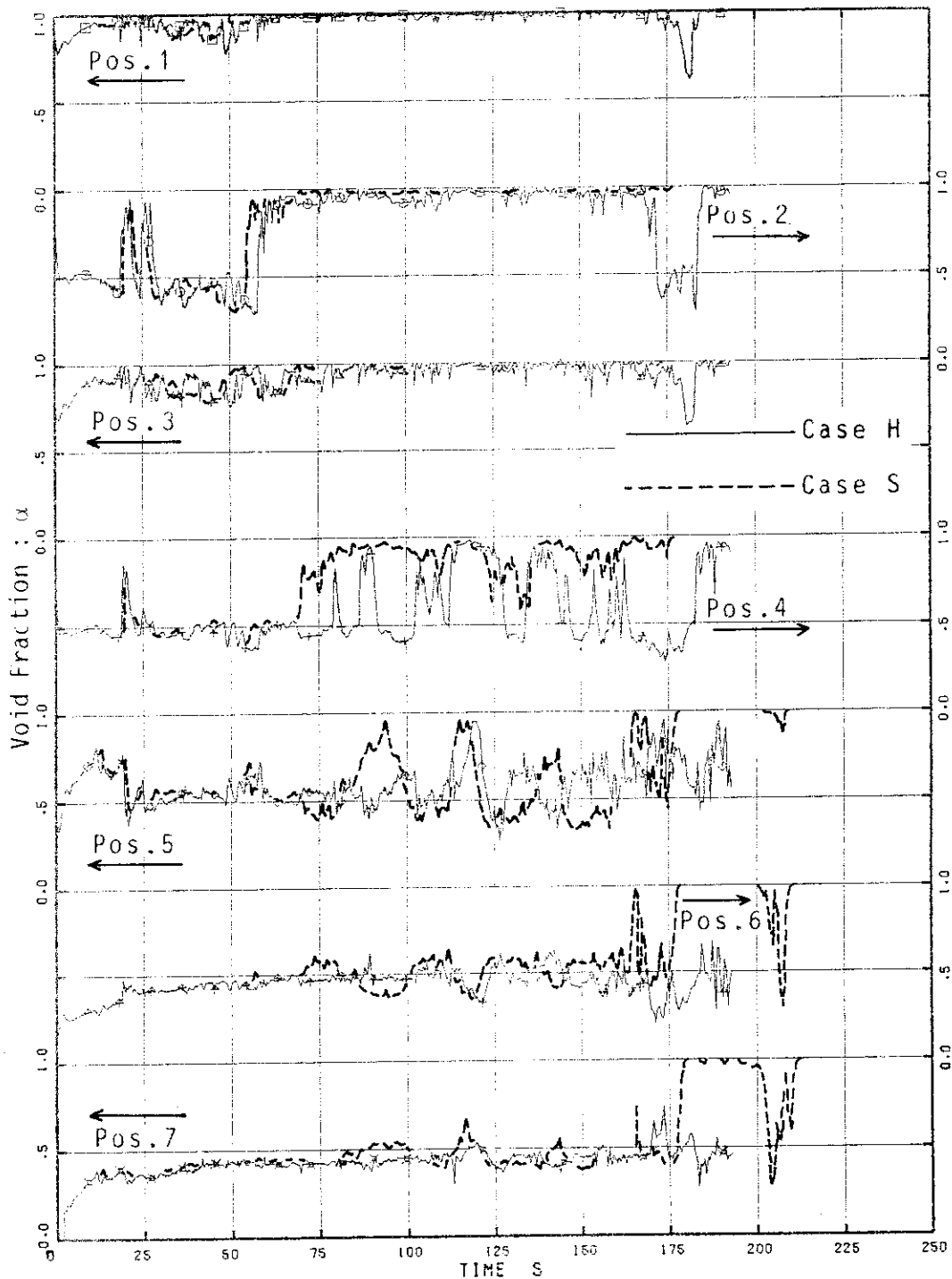


Fig. 5.33 Effect of wall stored heat on void fraction in the high-power channel (Cases S and H)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

Exp.Data Case S Case H

□ TE 202 ○ R TPS13 △ R TPS13

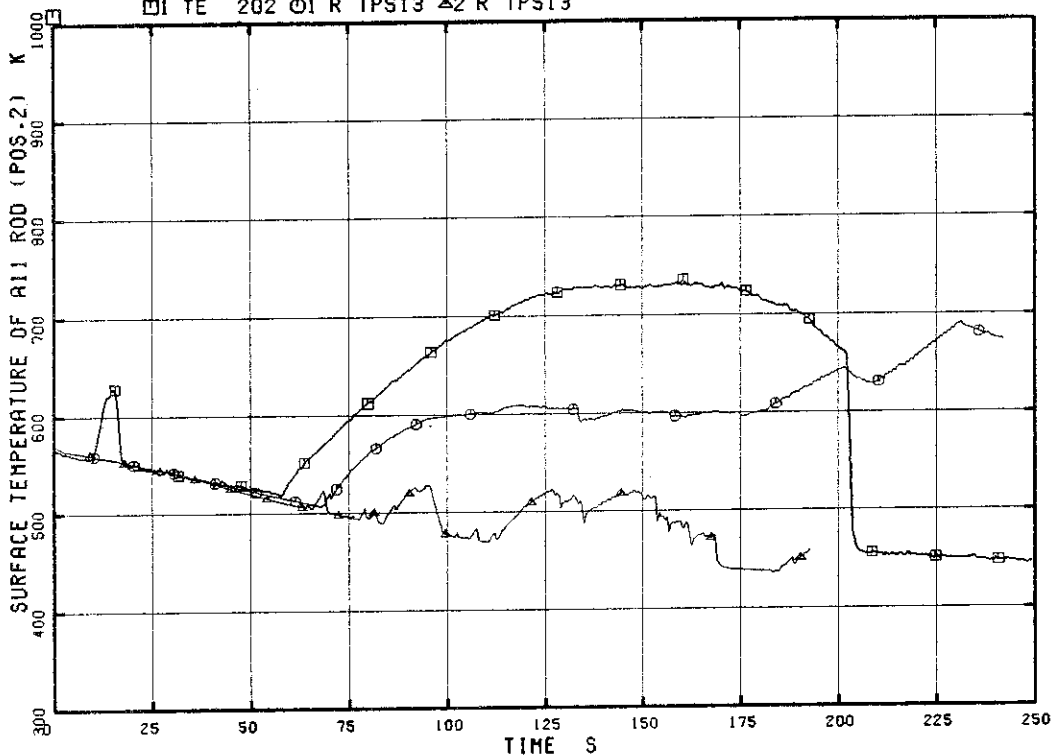


Fig. 5.35 Effect of wall stored heat on fuel surface temperature at Position 2 of high-power channel (Cases S and H)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

Exp.Data Case S Case H

□ TE 203 ○ R TPS12 △ R TPS12

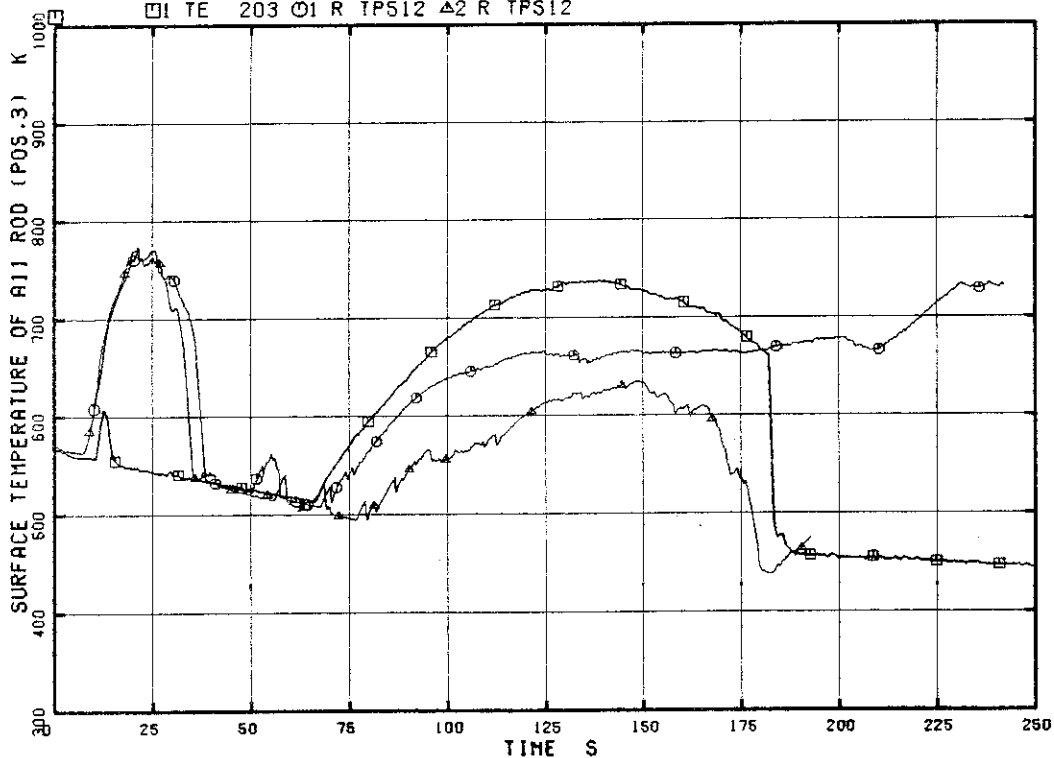


Fig. 5.36 Effect of wall stored heat on fuel surface temperature at Position 3 of high-power channel (Cases S and H)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

Exp.Data Case S Case H

□ TE 204 ○ R TPS11 ▲ 2 R TPS11

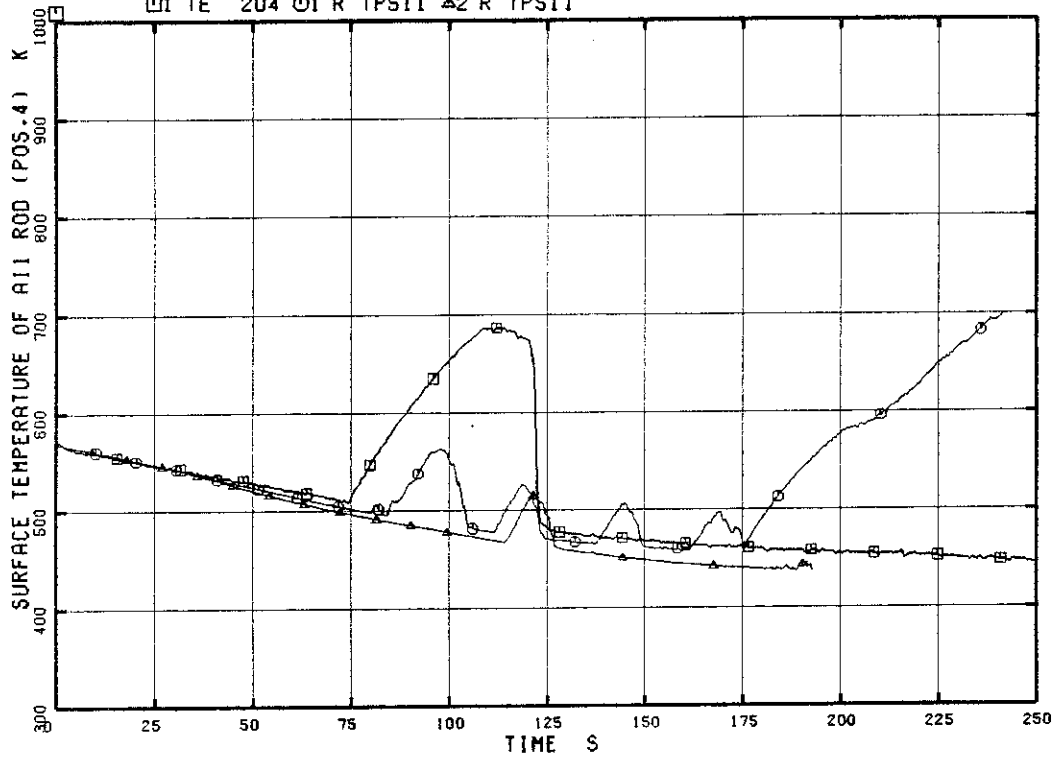


Fig. 5.37 Effect of wall stored heat on fuel surface temperature at Position 4 of high-power channel (Cases S and H)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

Exp.Data Case S Case H

□ TE 205 ○ R TPS10 ▲ 2 R TPS10

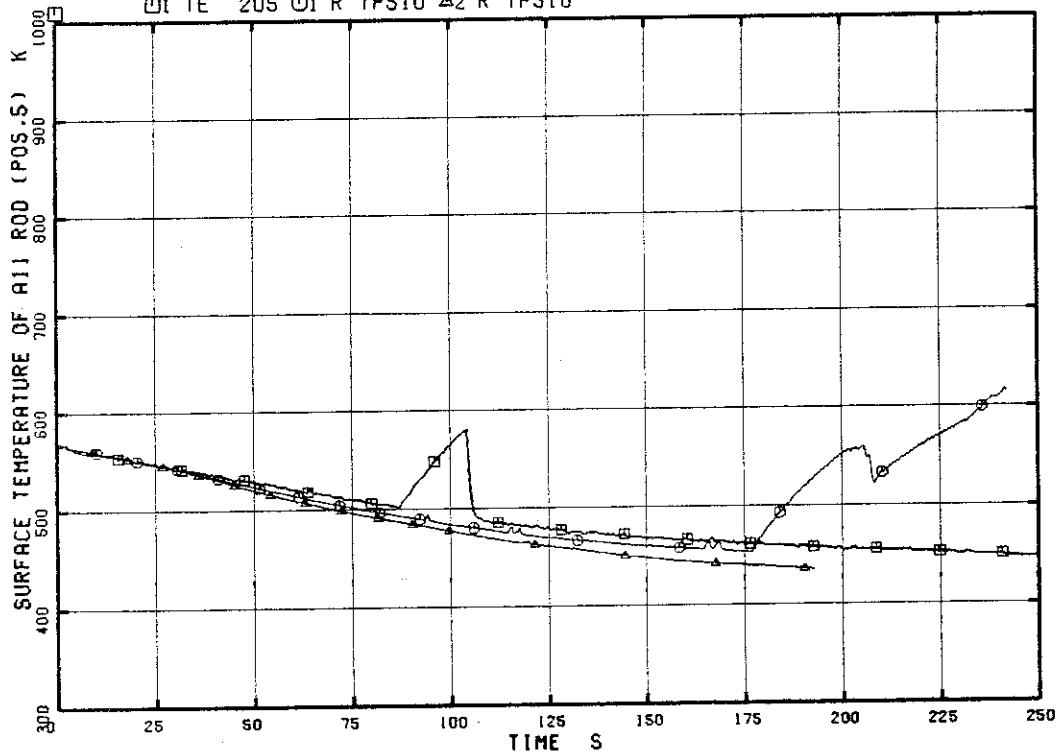


Fig. 5.38 Effect of wall stored heat on fuel surface temperature at Position 5 of high-power channel (Cases S and H)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

Exp. Data Case S Case H
 □ 1 TE 206 ○ 1 R TPS9 ▲ 2 R TPS9

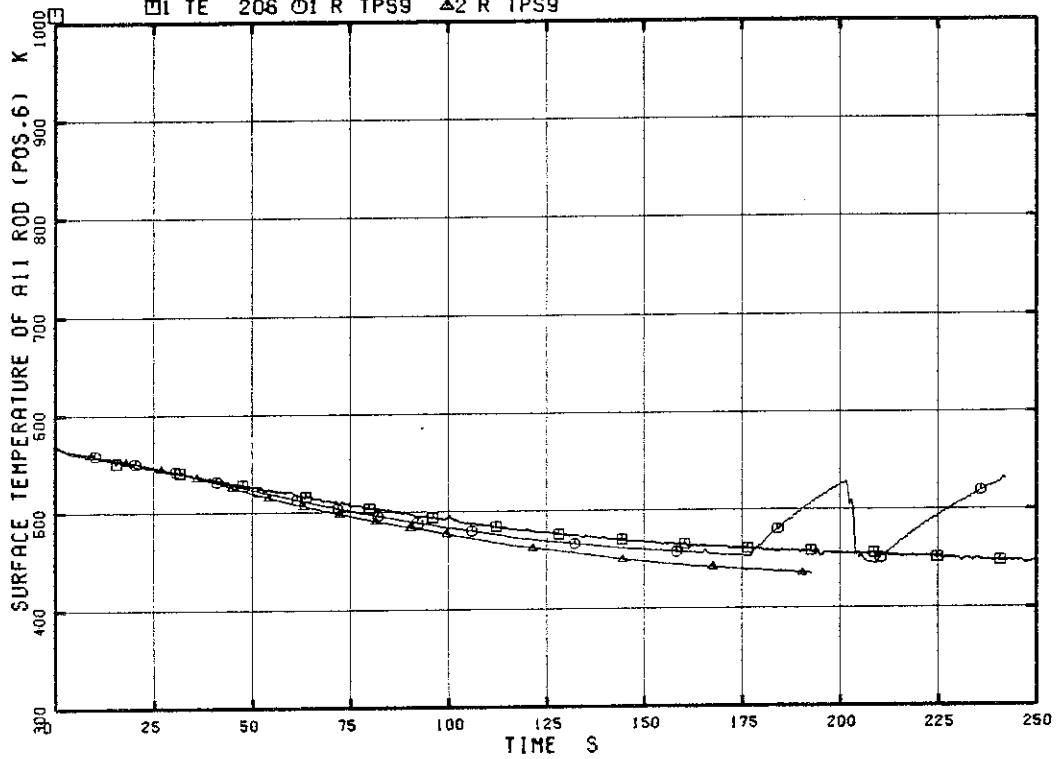


Fig. 5.39 Effect of wall stored heat on fuel surface temperature at Position 6 of high-power channel (Cases S and H)

ROSA-III RUN952 ANALYSIS RESULTS

Exp. Data Case S Case H
 □ 1 TE 207 ○ 1 R TPS8 ▲ 2 R TPS8

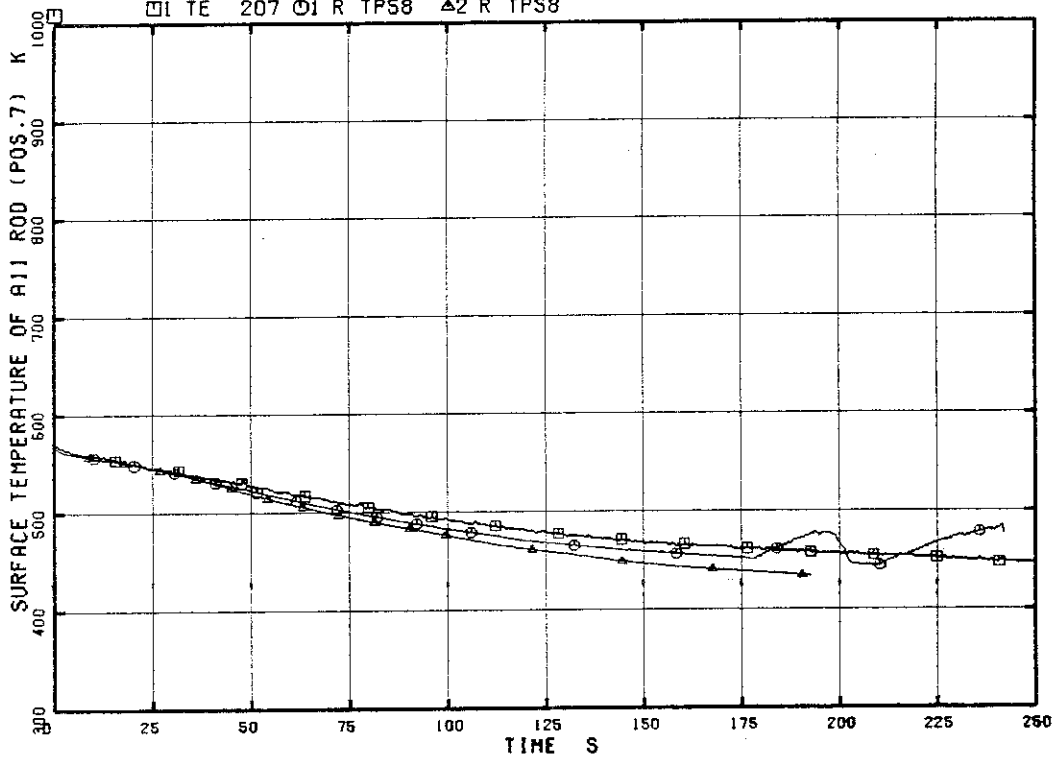


Fig. 5.40 Effect of wall stored heat on fuel surface temperature at Position 7 of high-power channel (Cases S and H)

6. 結 言

LOCA解析コードRELAP5/MOD1により、ROSA-Ⅲ100%主蒸気管破断実験・RUN952の解析を行なった。この解析の目的としたところは、BWRの主蒸気管破断事故の模擬実験としてはROSA-Ⅲが初めてであり、この分野の解析的研究も従来多くはなかったという背景を考え、主蒸気管破断事故解析へのコードの適用性を評価すること、及び実験的に明らかにされた主蒸気管破断事故時の主要な熱水力現象を解析的に裏づけることである。

実験結果と解析結果の比較及び感度解析により次のことがわかった。

- (1) 解析対象であるRUN952実験は、HPCSが作動した主蒸気管の100%破断実験であって、破断口が蒸気ライン1ヶ所であり、系内の質量・エネルギー収支が実験的に把握されるという点で、解析コードの性能評価に適した実験である。蒸気ラインの流出流量と系圧力が実験結果とよく一致した解析条件ケースSでは、減圧沸騰開始後のダウンカマーボイド率、上部ダウンカマー水位のスエリングの傾向、ダウンカマー側とシュラウド内（炉心側）のインベントリの変化、炉心内水位の低下と燃料表面温度の上昇開始、HPCS注入開始後のバイパス部の蓄水と炉心上端でのCCFL現象等、ブローダウン過程からECC水注入までの過程における圧力容器内の主要な熱流体挙動について、解析結果は実験結果とよく一致した。
- (2) 解析コードRELAP5/MOD1を主蒸気管破断事故解析に適用する上で留意する必要があるのは次の点である。第1は、高クオリティの二相流臨界流計算において流出流量を過大に計算するが、放出係数に0.5を採用すると実験結果とよく一致することである。第2は、種々の過渡状態における気水分離器の流動特性を正確に模擬するモデルがなく、100%主蒸気管破断実験の結果は、100%分離効率を仮定するセパレーターモデルによる解析結果と、一般のブランチモデルによる解析結果との中間的位置にあることである。なお、気水分離器の流動特性は、通過流体の流速、従って蒸気ライン破断口径等によっても変わるので、解析モデルの開発が必要である。第3に、バイパス部に蓄水するHPCS水が下部プレナムに流下して炉心に流入しにくく、従って炉心を下方から再冠水する現象を十分表わせないことである。第3の点については、装置の特性を模擬したモデリングに工夫を要する。
- (3) ROSA-Ⅲ装置とBWRの相似性を検討する視点から、圧力容器内保有水量の多い主蒸気管破断実験RUN952に対して、圧力容器壁の内部蓄積熱がダウンカマーボイド率その他の熱水力現象に及ぼす影響を感度解析により検討した。圧力容器壁蓄積熱は減圧に伴い徐々に増加するが、破断後70秒以後は炉心の伝熱量と同程度の大きさとなり無視しえないこと、そして破断後100秒で最高値を示し以後徐々に減少することがわかった。実際の現象も同様と考えられる。この蓄積熱放出は、系圧力の低下を抑制して流出蒸気流量を増加させ、残存水量を減少させるため、炉心のボイド率をその分だけ高くし、燃料表面温度を高めることがわかった。
- (4) 以上の事を総合して、ROSA-Ⅲ実験の主蒸気管破断実験RUN952で見られた圧力容器内の主要な現象については、再冠水過程の模擬が不十分であることを除けば、解析的にも裏

づけることができた。また、コードの性能評価について、LOCA解析コード RELAP5/MOD1コードは、(2)に述べた点に留意すれば、BWR体系の主蒸気管破断の解析に適用することができるといえる。

謝 辞

本稿をまとめるにあたり、安全工学第1研究室の熊丸博滋氏、情報システム研究所の山野和秋氏より多くの助言・援助を賜りました。ここに感謝の意を表わします。

参 考 文 献

- (1) Y. ANODA et. al., " ROSA-III System Description for Fuel Assembly No. 4 ", JAERI-M 9363 (1981)
- (2) K. TASAKA et. al., " Study on the Similarity between ROSA-III Experiment and BWR LOCA ", JAERI-M 6703 (1976)
- (3) M. SOBAJIMA et. al., " Experiment Data of ROSA-III Test RUN701 ", JAERI-M 8604 (1979)
- (4) Y. ANODA et. al., " Experiment Data of ROSA-III Test RUN704 ", JAERI-M 8968 (1980)
- (5) M. OKAZAKI et. al., " Experiment Data of ROSA-III Integral Test RUN705 ", JAERI-M 8723 (1980)
- (6) M. SUZUKI et. al., " Experiment Data of ROSA-III Integral Test RUN706 ", JAERI-M 8737 (1980)
- (7) M. OKAZAKI et. al., " Experiment Data of ROSA-III Integral Test RUN708 ", JAERI-M 8738 (1980)
- (8) Y. KOIZUMI et. al., " Experiment Data of ROSA-III Integral Test RUN710 ", JAERI-M 9249 (1981)
- (9) GE Company, " General Electric Standard Safety Analysis Report, BWR/6 ", DOCKET-STN-50477 (1978)
- (10) R. J. Wagner et. al., " RELAP5/MOD1 Code Manual Volumes 1 and 2 ", NUREG CR-1826, EGG-2070 (1982)
- (11) N. ABE et. al., " Electric Power Transient Curve for ROSA-III Tests ", JAERI-M 8728 (1980)
- (12) N. ABE et. al., " Prediction of ROSA-III Test RUN912 ", JAERI-M 9621 (1981)

づけることができた。また、コードの性能評価について、LOCA解析コード RELAP5/MOD1コードは、(2)に述べた点に留意すれば、BWR体系の主蒸気管破断の解析に適用することができるといえる。

謝 辞

本稿をまとめるにあたり、安全工学第1研究室の熊丸博滋氏、情報システム研究所の山野和秋氏より多くの助言・援助を賜りました。ここに感謝の意を表わします。

参 考 文 献

- (1) Y. ANODA et. al., " ROSA-III System Description for Fuel Assembly No.4 ", JAERI-M 9363 (1981)
- (2) K. TASAKA et. al., " Study on the Similarity between ROSA-III Experiment and BWR LOCA ", JAERI-M 6703 (1976)
- (3) M. SOBAJIMA et. al., " Experiment Data of ROSA-III Test RUN701 ", JAERI-M 8604 (1979)
- (4) Y. ANODA et. al., " Experiment Data of ROSA-III Test RUN704 ", JAERI-M 8968 (1980)
- (5) M. OKAZAKI et. al., " Experiment Data of ROSA-III Integral Test RUN705 ", JAERI-M 8723 (1980)
- (6) M. SUZUKI et. al., " Experiment Data of ROSA-III Integral Test RUN706 ", JAERI-M 8737 (1980)
- (7) M. OKAZAKI et. al., " Experiment Data of ROSA-III Integral Test RUN708 ", JAERI-M 8738 (1980)
- (8) Y. KOIZUMI et. al., " Experiment Data of ROSA-III Integral Test RUN710 ", JAERI-M 9249 (1981)
- (9) GE Company, " General Electric Standard Safety Analysis Report, BWR/6 ", DOCKET-STN-50477 (1978)
- (10) R. J. Wagner et. al., " RELAP5/MOD1 Code Manual Volumes 1 and 2 ", NUREG CR-1826, EGG-2070 (1982)
- (11) N. ABE et. al., " Electric Power Transient Curve for ROSA-III Tests ", JAERI-M 8728 (1980)
- (12) N. ABE et. al., " Prediction of ROSA-III Test RUN912 ", JAERI-M 9621 (1981)

づけることができた。また、コードの性能評価について、LOCA解析コード RELAP5/MOD1コードは、(2)に述べた点に留意すれば、BWR体系の主蒸気管破断の解析に適用することができるといえる。

謝 辞

本稿をまとめるにあたり、安全工学第1研究室の熊丸博滋氏、情報システム研究所の山野和秋氏より多くの助言・援助を賜りました。ここに感謝の意を表わします。

参 考 文 献

- (1) Y. ANODA et. al., " ROSA-III System Description for Fuel Assembly No.4 ", JAERI-M 9363 (1981)
- (2) K. TASAKA et. al., " Study on the Similarity between ROSA-III Experiment and BWR LOCA ", JAERI-M 6703 (1976)
- (3) M. SOBAJIMA et. al., " Experiment Data of ROSA-III Test RUN701 ", JAERI-M 8604 (1979)
- (4) Y. ANODA et. al., " Experiment Data of ROSA-III Test RUN704 ", JAERI-M 8968 (1980)
- (5) M. OKAZAKI et. al., " Experiment Data of ROSA-III Integral Test RUN705 ", JAERI-M 8723 (1980)
- (6) M. SUZUKI et. al., " Experiment Data of ROSA-III Integral Test RUN706 ", JAERI-M 8737 (1980)
- (7) M. OKAZAKI et. al., " Experiment Data of ROSA-III Integral Test RUN708 ", JAERI-M 8738 (1980)
- (8) Y. KOIZUMI et. al., " Experiment Data of ROSA-III Integral Test RUN710 ", JAERI-M 9249 (1981)
- (9) GE Company, " General Electric Standard Safety Analysis Report, BWR/6 ", DOCKET-STN-50477 (1978)
- (10) R. J. Wagner et. al., " RELAP5/MOD1 Code Manual Volumes 1 and 2 ", NUREG CR-1826, EGG-2070 (1982)
- (11) N. ABE et. al., " Electric Power Transient Curve for ROSA-III Tests ", JAERI-M 8728 (1980)
- (12) N. ABE et. al., " Prediction of ROSA-III Test RUN912 ", JAERI-M 9621 (1981)

Appendix (1)

```

1  =KOSA-III RUN952 PRE-ANALYSIS ,100% STEAM L- BREAK (FULL ECCS)
2  *****
3  *
4  * RRRRRRRR K GGGUUUCCGG SSSSSSSSS AAAA IIIIIIIIIIIIIIIIIII
5  * RRRRRRRR K GGGUUUCCGG SSSSSSSSS AAAA IIIIIIIIIIIIIIIIIII
6  * R R RR CC CC SS IIIIIIIIIIIIIIIIIII
7  * R R RR CC CC SS IIIIIIIIIIIIIIIIIII
8  * RRRRRRRR K CC SSSSSSSSS AA AA IIIIIIIIIIIIIIIIIII
9  * RRRRRRRR K CC SSSSSSSSS AA AA IIIIIIIIIIIIIIIIIII
10 * R R RR CC CC SSSSSSSSS AA AA IIIIIIIIIIIIIIIIIII
11 * R R RR CC CC SSSSSSSSS AA AA IIIIIIIIIIIIIIIIIII
12 * R R RR CC CC SSSSSSSSS AA AA IIIIIIIIIIIIIIIIIII
13 * R R RR CC CC SSSSSSSSS AA AA IIIIIIIIIIIIIIIIIII
14 * R R RR CC CC SSSSSSSSS AA AA IIIIIIIIIIIIIIIIIII
15 * R R RR CC CC SSSSSSSSS AA AA IIIIIIIIIIIIIIIIIII
16 *
17 *
18 *
19 *
20 * BASE INPUT DATA WAS CREATED ON 1982-2-16
21 * THIS INPUT WAS REMODELED FOR 100% MSL BREAK FROM THAT OF RUN 951
22 * ON 1982-5-13, REMODELED AGAIN ON 1982-9-7
23 * BASE INPUT J3491-RLP2SA1.DAT(8912HI13)
24 * PUMP AT JET PUMP SUCTION
25 *
26 *RELAP5/MOD1 INPUT DATA
27 *
28 *
29 *
30 *
31 * INPUT CHECK
32 *
33 *
34 *
35 *
36 *
37 *
38 *
39 *
40 *
41 *
42 *
43 *
44 *
45 *
46 *
47 *
48 *
49 *
50 *
51 *
52 *
53 *
54 *
55 *
56 *
57 *
58 *
59 *
60 *

```

(2)

```

61 *
62 *
63 *
64 *
65 *
66 *
67 *
68 *
69 *
70 *
71 *
72 *
73 *
74 *
75 *
76 *
77 *
78 *
79 *
80 *
81 *
82 *
83 *
84 *
85 *
86 *
87 *
88 *
89 *
90 *
91 *
92 *
93 *
94 *
95 *
96 *
97 *
98 *
99 *
100 *
101 *
102 *
103 *
104 *
105 *
106 *
107 *
108 *
109 *
110 *
111 *
112 *
113 *
114 *
115 *
116 *
117 *
118 *
119 *
120 *
121 *
122 *

```

```

REFERENCES
1. JAERI-M 8588 RELAP4J INPUT DATA FOR KOSA-III RUN 704
2. JAERI-M 8499 PIPING ETC
3. MECHANICAL ENGINEERING HANDBOOK
4. RELAP5 USERS MANUAL VOL 1,2,3
5. LFT INPUT DATA FOR RELAP5 CALCULATION

FUNDAMENTAL ASSUMPTION
NONHOMOGENEOUS, NONEQUILIBRIUM ..... INSIDE VESSEL

NOTE
ALL BEND RESISTANCES ARE CALCULATED FROM REFERENCE 3
ALL WALL ROUGHNESS ARE CONSTANT
E = 0.00005 (H)

LOWER PLENUM BELOW TIE GRID (VOLUME 1 .... RELAP4J)
NAME TYPE
COLD BRANCH
NO JUN INITIAL C.C
1
AREA LEN VOL HZ VR ELV ROUG HYD FE
C.O 0.325 0.05709 0.0 90.0 0.325 0.00005 0.0 00
CFL PRESSURE TEMP ZENL
3 7.44120*6 556.35 0.0
FR IG AREA F-LOSS R-LOSS CANS
C1010000 0.0000000 0.0 0.01 0.01 0000
C10010000 0.0000000 0.04366 0.01 0000
C10010000 0.0000000 1.758-4 0.0 0.0 0100
FLOW-F FLOW-G VELJ
14.3500 0.0 0.0
15.1455 0.0 0.0
2.2044 0.0 0.0

LOWER PLENUM BELG C010
NAME TYPE
C011 BRANCH
NO JUN INITIAL C.C
2
AREA LEN VOL HZ VR ELV ROUG HYD FE
0.3595 0.1850 0.0 0.0 90.0 0.185 0.00005 0.1369 00
CFL PRESSURE TEMP ZENL
3 7.4425*6 556.36 0.0
FR IG AREA F-LOSS R-LOSS CANS
195010000 0.1100000 0.0 0.0 0.0 0100
245010000 0.1100000 0.0 0.0 0.0 0100
FLOW-F FLOW-G VELJ

```


(6)

LINE	NAME	TYPE	NAME	TYPE	NAME	TYPE	NAME	TYPE	NAME	TYPE
309	0600000									
310	0600101									
311	0600200									
312										
313										
314										
315										
316	0610000									
317	0610001									
318	0610101									
319	0610200									
320	0611101									
321	0612101									
322	0613101									
323	0611201									
324	0612201									
325	0613201									
326										
327										
328										
329	0620000									
330	0620101									
331	0620200									
332										
333										
334										
335										
336										
337										
338										
339	0700000									
340	0700001									
341	0700101									
342	0700200									
343	0701101									
344	0702101									
345	0703101									
346	0701201									
347	0702201									
348	0703201									
349										
350										
351										
352										
353										
354	0710000									
355	0710101									
356	0710200									
357										
358										
359										
360	0720000									
361	0720101									
362	0720201									
363										
364										
365										
366										
367										
368										
369	0800000									
370										

(5)

LINE	NAME	TYPE	NAME	TYPE	NAME	TYPE	NAME	TYPE	NAME	TYPE
247	0450303									
248	0450304									
249	0450305									
250	0450401									
251	0450501									
252	0450601									
253	0450701									
254	0450702									
255	0450703									
256	0450704									
257	0450705									
258	0450801									
259	0450901									
260	0451001									
261	0451101									
262	0451201									
263	0451202									
264	0451203									
265	0451204									
266	0451205									
267	0451206									
268	0451207									
269	0451300									
270	0451301									
271	0451302									
272	0451303									
273	0451304									
274	0451305									
275	0451306									
276										
277										
278										
279	UPPER PLENUM									
280										
281										
282	0500000									
283										
284										
285	0500001									
286										
287										
288	0500101									
289										
290										
291	0500200									
292										
293										
294	0501101									
295	0502101									
296	0503101									
297	0504101									
298										
299										
300	0501201									
301	0502201									
302	0503201									
303	0504201									
304										
305										
306										
307	STEAM SEPARATOR									
308										

(13)

LINE NO	NAME	TYPE	INLET LINE	(VOLUME15 RELAP4J)
743	1801101	160010000	180000000	0.000111 0.0 0.0 0.100
744	1802101	180010000	185000000	0.000585 0.0 0.0 0.000
745	1801201	3.23 0.0 0.0		
746	1802201	3.19 0.0 0.0		
747	*****	*****	*****	*****
748	*****	*****	*****	*****
749	*****	*****	*****	*****
750	*****	*****	*****	*****
751	*****	*****	*****	*****
752	*****	*****	*****	*****
753	*****	*****	*****	*****
754	1850000	C185	PIPE	
755	1850001	2		
756	1850101	0.0	1	
757	1850102	4.289-3	2	
758	*****	*****	*****	*****
759	*****	*****	*****	*****
760	1850201	0.0	1	
761	*****	*****	*****	*****
762	*****	*****	*****	*****
763	*****	*****	*****	*****
764	1850301	4.1917	1	
765	1850302	1.9464	2	
766	*****	*****	*****	*****
767	*****	*****	*****	*****
768	*****	*****	*****	*****
769	1850401	1.79584-2	1	
770	1850402	0.0	2	
771	*****	*****	*****	*****
772	*****	*****	*****	*****
773	1850501	0.0	2	
774	1850601	-90.0	1	
775	1850602	0.0	2	
776	1850701	-2.221	1	
777	1850702	0.0	2	
778	*****	*****	*****	*****
779	*****	*****	*****	*****
780	*****	*****	*****	*****
781	1850801	0.00005	0.0739 1	
782	1850802	0.00005	0.0739 2	
783	*****	*****	*****	*****
784	*****	*****	*****	*****
785	*****	*****	*****	*****
786	1850901	0.4	0.4 1	
787	*****	*****	*****	*****
788	*****	*****	*****	*****
789	*****	*****	*****	*****
790	1851001	0.0	2	
791	1851101	0.000	1	
792	1851201	3	7.47596+6 556.36 0.0 0.0 1	
793	1851202	3	7.45466+6 556.36 0.0 0.0 2	
794	*****	*****	*****	*****
795	*****	*****	*****	*****
796	*****	*****	*****	*****
797	1851300	1	0.0 0.0 1	
798	1851301	8.19	0.0 0.0	
799	*****	*****	*****	*****
800	*****	*****	*****	*****
801	*****	*****	*****	*****
802	*****	*****	*****	*****
803	*****	*****	*****	*****
804	*****	*****	*****	*****

(14)

LINE NO	NAME	TYPE	INLET LINE	(VOLUME17 RELAP4J)
805	2000000	C200	PIPE	
806	2000001	5		
807	2000101	0.0019244	5	
808	2000201	0.0	4	
809	2000301	4.5444	1	
810	2000302	2.5425	2	
811	2000303	2.0659	3	
812	2000304	2.6396	4	
813	2000305	2.3574	5	
814	2000401	0.0	5	
815	2000501	0.0	5	
816	2000601	-90.0	1	
817	2000602	0.0	2	
818	2000603	-90.0	3	
819	2000604	0.0	4	
820	2000605	-90.0	5	
821	2000701	-1.439	1	
822	2000702	0.0	2	
823	2000703	-0.219	3	
824	2000704	0.0	4	
825	2000705	-1.515	5	
826	2000801	0.00005	0.0495 5	
827	2000901	0.24	1	
828	2000902	0.0	2	
829	2000903	0.32	3	
830	2000904	0.17	4	
831	2001001	0.0	5	
832	2001101	0.000	4	
833	2001201	3	7.43079+6 556.36 0.0 0.0 1	
834	2001202	3	7.44488+6 556.36 0.0 0.0 2	
835	2001203	3	7.45755+6 556.36 0.0 0.0 3	
836	2001204	3	7.47063+6 556.36 0.0 0.0 4	
837	2001205	3	7.48317+6 556.36 0.0 0.0 5	
838	2001300	1		
839	2001301	3.20	0.0 0.0 4	
840	*****	*****	*****	*****
841	*****	*****	*****	*****
842	*****	*****	*****	*****
843	*****	*****	*****	*****
844	*****	*****	*****	*****
845	*****	*****	*****	*****
846	2100000	C210	PUMP	
847	*****	*****	*****	*****
848	*****	*****	*****	*****
849	2100101	0.0	0.005295 0.0 -90.0 -0.26 0	
850	*****	*****	*****	*****
851	*****	*****	*****	*****
852	2100108	VOL NC	AREA F-LOSS R-LOSS CAHS	
853	*****	*****	*****	*****
854	*****	*****	*****	*****
855	2100109	VOL NC	AREA F-LOSS R-LOSS CAHS	
856	*****	*****	*****	*****
857	*****	*****	*****	*****
858	2100200	CTL	PRESSURE I-TEMP ZERU	
859	*****	*****	*****	*****
860	*****	*****	*****	*****
861	2100201	CTL	FLOW-F FLOW-G VELLJ	
862	*****	*****	*****	*****
863	*****	*****	*****	*****
864	2100202	CTL	FLOW-F FLOW-G VELLJ	
865	*****	*****	*****	*****
866	*****	*****	*****	*****

(17)

```

991 2450702 0.0 2
992 *
993 *
994 *
995 2450801 0.00005 0.0739 1
996 2450802 0.00005 0.0739 2
997 *
998 *
999 2450901 0.4 0.4 1
1000 *
1001 *
1002 *
1003 2451001 00 2
1004 2451101 0000 1
1005 2451201 3 7.48349+6 556.36 0.0 0.0 1
1006 2451202 3 7.45465+6 556.36 0.0 0.0 2
1007 *
1008 *
1009 *
1010 2451300 1 1 0.0 0.0 1
1011 2451301 8.16 0.0 0.0 1
1012 *
1013 *
1014 *
1015 *
1016 *
1017 * MAIN STEAM LINE (TRANSIENT LINE, BREAK LOCATION)
1018 *
1019 *
1020 *
1021 3000000 C300 SINGLJUN
1022 3000101 080010000 50000000 1.92-3 1.0 1.0 0600
1023 3000201 0 0.0 0.0
1024 *
1025 *
1026 *
1027 *
1028 * MAIN STEAM LINE
1029 *
1030 * NAME TYPE
1031 5000000 C500 PIPE
1032 *
1033 * NG-VOL
1034 5000001 2
1035 *
1036 * AREA VOL NO
1037 5000101 0.0 2
1038 *
1039 * AREA JUN NO
1040 5000201 0.0 1
1041 *
1042 * LEN VOL NO
1043 5000301 3.50 1
1044 5000302 0.83 2
1045 *
1046 5000401 0.026 1
1047 5000402 0.0016 2
1048 *
1049 5000501 0.0 2
1050 *
1051 * VR VOL NO
1052 5000601 0.0 2

```

(18)

```

* 1053 *
* 1054 * ELV VOL NO
* 1055 5000701 0.0 2
* 1056 *
* 1057 * ROUGH HYD VOL NO
* 1058 5000801 0.00005 0.0 2
* 1059 *
* 1060 * F-LDSS K-LDSS JUN NO
* 1061 5000901 0.1 2.0 1
* 1062 *
* 1063 * FE VOL NO
* 1064 5001001 00 2
* 1065 *
* 1066 * CAHS JUN NO
* 1067 5001101 0000 1
* 1068 *
* 1069 * CTL PRESSURE QUALITY ZERO VOL
* 1070 5001201 2 7.3500+6 0.99999 0.0 0.0 2
* 1071 * CTL
* 1072 5001300 1
* 1073 *
* 1074 * FLOW-F FLOW-G VELJ JUN NO
* 1075 5001301 0.0 0.0 0.0 1
* 1076 *
* 1077 *
* 1078 *
* 1079 * VALVE C510 ( BREAK CRIFICE DR-5 IN RUN 952 ) CD=0.5
* 1080 *
* 1081 * NAME TYPE
* 1082 5100000 C510 VALVE
* 1083 *
* 1084 * FR TO AREA F-LDS K-LDS CAHS SDC TFDC
* 1085 5100101 500010000 540000000 3.774-4 0.0 0.0 0100
* 1086 *
* 1087 * CTL FLOW-F FLOW-G VELJ
* 1088 5100201 0 0.0 0.0 0.0
* 1089 *
* 1090 * VALVE TYPE TRIP-NG
* 1091 5100300 TRPVLV
* 1092 5100301 501
* 1093 *
* 1094 *
* 1095 *
* 1096 * CONTAINMENT TYPE
* 1097 * NAME
* 1098 5400000 C540 TMDPVOL
* 1099 *
* 1100 * AREA LEN VOL HZ VR ELV ROU HYD FE
* 1101 5400101 1.0+3 0.0 1.0+6 0.0 0.0 0.0 0.0 11
* 1102 *
* 1103 * CTL
* 1104 5400200 3
* 1105 *
* 1106 * TIME PRESSURE TEMP
* 1107 5400201 0.0 9.8043+4 313.0 * CONSTANT
* 1108 *
* 1109 *
* 1110 *
* 1111 * MAIN STEAM (STEADY ST-LINE) RESE<VDIN
* 1112 *
* 1113 *
* 1114 2910000 C291 -1M0PVOL

```


(19)

(20)

1115	2910101	1.0+3	0.0	1.0+5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11*
1116	2910200	3									
1117	2910201	0.0	0.0	0.0	0.0	302.15					* CONSTANT*
1118											
1119											
1120											
1121											
1122											
1123	3010101	C301	TMDPJUN								
1124	3010200	080010000	29100000	1.0							
1125	3010201	1	* 4L(KG/S)	43(KG/S)							
1126	3010202	0.0	2.04-5	2.04	0.0						
1127	3010203	0.001	2.04-5	2.04	0.0						
1128	3010204	0.002	0.0	0.0	0.0						
1129		1000.0	0.0	0.0	0.0						
1130											
1131											
1132											
1133											
1134	3100000	NAME	TYPE								
1135		C310	TMDPVUL								
1136		AREA	LEN	VOL	HZ	VK	ELV	KUU	HYD	FE	
1137	3100101	1.0+3	0.0	1.0+5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11	
1138											
1139											
1140	3100200	CTL									
1141		3									
1142		TIME	PRESSURE	TEMP							
1143	3100201	0.0	7.5505+6	439.15							* CONSTANT
1144											
1145											
1146											
1147											
1148											
1149											
1150	3200000	NAME	TYPE								
1151		C320	TMDPJUN								
1152		FR	TO	AREA							
1153	3200101	310000000	111010000	1.0							
1154											
1155											
1156	3200200	CTL									
1157		0									
1158		TIME	FLOW-F	FLDCE-G	VELJ						
1159	3200201	0.0	2.36-3	0.0	0.0						
1160	3200202	2.0	2.36-3	0.0	0.0						
1161	3200203	3.1	0.0	0.0	0.0						
1162	3200204	1000.0	0.0	0.0	0.0						
1163											
1164											
1165											
1166											
1167											
1168											
1169											
1170											
1171											
1172											
1173											
1174											
1175											
1176											

(22)

1239	10020702	900	0.01270	0.0	0.0	2		1100701	0	0.0	0.0	0.0	1		
1240	10020703	900	0.01708	0.0	0.0	2		1100801	0	0.7	0.0	0.5	3		
1241	10020704	900	0.03952	0.0	0.0	4		*							
1242	10020705	900	0.01708	0.0	0.0	5		11200000	1	4	2	1	0.3		
1243	10020706	900	0.01270	0.0	0.0	5		11200100	0	1					
1244	10020707	900	0.00684	0.0	0.0	7		11200101	3	0.345					
1245	10020801	0	0.0	0.0	0.0	7		11200201	5	3					
1246	10020901	0	0.01290	0.01290	0.2350	3		11200301	0.0	3					
1247	10020902	0	0.01290	0.01290	0.4700	4		11200400	0						
1248	10020903	0	0.01290	0.01290	0.2350	7		11200401	560.0	4					
1249	*							11200501	11001000	0	1	1	0.1634	1	
1250	*****							11200601	900010000	0	3910	1	0.1634	1	
1251	L.P.F.=1.0 AND D.875							11200701	0	0.0	0.0	0.0	1		
1252	*							11200801	0	0.5	0.0	0.5	1		
1253	10030000	7	9	2	1	0.0		*							
1254	10030100	0010						11300000	3	4	2	1	0.3		
1255	10030400	0010						11300100	0	1					
1256	10030501	0	0	0	0.0	7		11300101	3	0.340					
1257	10030601	045010000	10000	1	0	0.3805	3	11300201	5	3					
1258	10030602	045040000	0	1	0	0.7609	4	11300301	0.0	3					
1259	10030603	045050000	10000	1	0	0.3805	7	11300400	0						
1260	10030701	900	0.01252	0.0	0.0	1		11300401	560.0	4					
1261	10030702	900	0.02324	0.0	0.0	2		11300501	11010000	0	1	1	0.1534	1	
1262	10030703	900	0.03124	0.0	0.0	3		11300502	112030000	0	1	1	0.4475	2	
1263	10030704	900	0.07230	0.0	0.0	4		11300503	112020000	0	1	1	0.4475	2	
1264	10030705	900	0.03124	0.0	0.0	5		11300601	900010000	0	3910	1	0.1634	1	
1265	10030706	900	0.02324	0.0	0.0	6		11300602	900010000	0	3910	1	0.4475	2	
1266	10030707	900	0.01252	0.0	0.0	7		11300603	900010000	0	3910	1	0.4475	3	
1267	10030801	0	0.0	0.0	0.0	7		11300701	0	0.0	0.0	0.0	2		
1268	10030901	0	0.01290	0.01290	0.2350	3		11300801	0	0.6	0.0	0.5	2		
1269	10030902	0	0.01290	0.01290	0.4700	4		*							
1270	10030903	0	0.01290	0.01290	0.2350	7		11400000	8	4	2	1	0.245		
1271	*							11400100	0	1					
1272	*****							11400101	3	0.235					
1273	*							11400201	5	3					
1274	*****							11400301	0.0	2					
1275	*****							11400400	0						
1276	11000000	1	4	1	1	0.0		11400401	560.0	4					
1277	11000100	0	1					112010000	112010000	0	1	1	0.391	1	
1278	11000101	3	0.21					11400501	120010000	0	1	1	0.3	2	
1279	11000201	5	3					11400502	130010000	0	1	1	0.382	3	
1280	11000301	0.0	3					11400503	130010000	0	1	1	0.382	4	
1281	11000400	0						11400504	130010000	0	1	1	0.382	5	
1282	11000401	560.0	4					11400505	130010000	0	1	1	0.435	6	
1283	11000501	080010000	0	1	0	0.5153	1	11400506	130010000	0	1	1	0.288	7	
1284	11000601	900010000	0	3910	0	0.5153	1	11400507	131010000	0	1	1	0.3	8	
1285	11000701	0	0.0	0.0	0.0	1		11400601	900010000	0	3910	1	0.391	1	
1286	11000801	0	0.7	0.0	0.5	1		11400602	900010000	0	3910	1	0.3	2	
1287	*							11400603	900010000	0	3910	1	0.382	3	
1288	11100000	3	4	2	1	0.35		11400604	900010000	0	3910	1	0.382	4	
1289	11100100	0	1					11400605	900010000	0	3910	1	0.382	5	
1290	11100101	3	0.405					11400606	900010000	0	3910	1	0.436	6	
1291	11100201	5	3					11400607	900010000	0	3910	1	0.282	7	
1292	11100301	0.0	3					11400608	900010000	0	3910	1	0.3	8	
1293	11100400	0						11400701	0	0.0	0.0	0.0	2		
1294	11100401	560.0	4					11400801	0	0.492	0.0	0.5	2		
1295	11100501	080010000	0	1	1	0.348	1	*							
1296	11100502	080010000	0	1	1	0.5037	2	11500000	2	4	2	1	0.350		
1297	11100503	071010000	0	1	1	0.1434	3	11500100	0	1					
1298	11100601	900010000	0	3910	1	0.348	1	11500101	3	0.505					
1299	11100602	900010000	0	3910	1	0.5037	2	11500201	5	3					
1300	11100603	900010000	0	3910	1	0.1434	3	11500301	0.0	2					

(23)

(24)

1363	11500400	0	1	1	0.321	1	20100402	589.71	19.1904	595.82	20.9350	810.93	22.8665
1364	11500401	560.0	4	1	0.321	1	20100403	922.04	24.7357	1033.15	26.8541	1144.26	28.9102
1365	11500501	010010000	0	1	0.194	2							
1366	11500502	011010000	0	1	0.321	1							
1367	11500601	900010000	0	3910	0.194	2	20100501	273.15	15.2620	773.15	20.9350		
1368	11500602	0	0.0	0.0	0.0	2							
1369	11500701	0	0.7	0.0	0.5	2							
1370	11500801	1	4	1	0.0								
1371	11600000	0	1	0.190									
1372	11600100	3	0.190										
1373	11600101	5	3										
1374	11600201	0.0	3										
1375	11600301	0											
1376	11600400	560.0	4	0	0.801	1							
1377	11600501	010010000	0	1	0.801	1							
1378	11600601	011010000	0	1	0.801	1							
1379	11600701	0	0.0	0.0	0.0	1							
1380	11600801	0	0.7	0.0	0.5	1							
1381	11600901												
1382	11600901												
1383													
1384													
1385													
1386													
1387													
1388													
1389													
1390													
1391													
1392													
1393													
1394													
1395													
1396													
1397													
1398													
1399													
1400													
1401													
1402													
1403													
1404													
1405													
1406													
1407													
1408													
1409													
1410													
1411													
1412													
1413													
1414													
1415													
1416													
1417													
1418													
1419													
1420													
1421													
1422													
1423													
1424													

(25)

```

1487 20290014 300.0 0.-2739*6
1488 20290015 480.0 0.2500*6
1489 20290016 600.0 0.2342*5
1490 20290017 1800.0 0.1795*5
1491 *
1492 *
1493 *
1494 *
1495 * HEAT LOSS FROM VESSEL WALL
1496 * OVERALL COEFFICIENT OF HEAT TRANSFER
1497 *
1498 * HTC-T
1499 * POWER
1500 * TIME 51.2
1501 20291001 0.0
1502 20291002 1000.0 51.2
1503 *
1504 *
1505 *
1506 * C333 TMDPVOL
1507 33301C1 1.0E+3 0.0 1.0*5 0.0 0.0 C.0 0.0 0.0 C II
1508 33302C0 3
1509 33302C1 0.0 0.39541*6 313.15
1510 *
1511 *
1512 * C370 TMDPJUN
1513 3700101 333000000 050000000 1.0
1514 3700200 0
1515 3700201 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
1516 3700202 94.0 0.0 0.0 0.0
1517 3700203 95.0 6.400-4 0.0 0.0
1518 3700204 96.0 8.048-4 0.0 0.0
1519 3700205 97.0 5.240-4 0.0 0.0
1520 3700206 100.0 8.288-4 0.0 0.0
1521 3700207 1000.0 8.288-4 0.0 0.0
1522 *
1523 *
1524 * FEED WATER LINE PIPING
1525 *
1526 * NAME TYPE
1527 40000G0 C400 SINGLVOL
1528 *00001 10
1529 4000101 0.001924 18.58 0.0 0.0 -90.0 -7.11 5.0-5 0.0 00
1530 *000102 0.001924 10
1531 4000200 3 7.36105*6 489.2 0.0 0.0
1532 *000301 0.770 1
1533 *
1534 *
1535 * HEAT SINK FOR HEAT LOSS
1536 *
1537 *
1538 9000000 C900 TMDPVOL
1539 9000101 1.43 0.0 1.46 0.0 90.0 10.0 0.0 0.0 11
1540 9000200 3
1541 9000201 0.0 0.09904*6 303.15 * CONSTANT
1542 *
1543 *
1544 9100000 C910 VALVE
1545 9100101 0E0010000 900000000 1.0-3 0.0 0.0 0100
1546 9100201 1 0.0 0.0
1547 9100300 TRPVLY 527
1548 9100301

```

(26)

```

* MINOR EDIT
*
0000301 P 010010000
0000302 MFLOWJ 171020000
0000303 MFLOWJ 185010000
0000304 MFLOWJ 180010000
0000305 MFLOWJ 180020000
0000306 MFLOWJ 231020000
0000307 MFLOWJ 245010000
0000308 MFLOWJ 240010000
0000309 MFLOWJ 240020000
0000310 P 090010000
0000311 MFLOWJ 030030000
0000312 MFLOWJ 050020000
0000313 VOIDG 040070000
0000314 VOIDG 001000109
0000315 HTTEMP 001000209
0000316 HTTEMP 001000309
0000317 HTTEMP 001000409
0000318 HTTEMP 001000509
0000319 HTTEMP 001000609
0000320 HTTEMP 001000709
0000321 HTTEMP 002000109
0000322 HTTEMP 002000209
0000323 HTTEMP 002000309
0000324 HTTEMP 002000409
0000325 HTTEMP 002000509
0000326 HTTEMP 002000609
0000327 HTTEMP 002000709
0000328 MFLOWJ 150010000
0000329 MFLOWJ 150020000
0000330 MFLOWJ 210010000
0000331 MFLOWJ 210020000
0000332 MFLOWJ 010010000
0000333 MFLOWJ 010020000
0000334 MFLOWJ 011010000
0000335 MFLOWJ 011020000
0000336 MFLOWJ 510000000
0000337 MFLOWJ 120010000
0000338 MFLOWJ 120020000
0000339 MFLOWJ 120030000
0000340 MFLOWJ 120040000
0000341 MFLOWJ 300000000
0000342 MFLOWJ 500010000
0000343 MFLOWJ 050020000
0000344 VEFJ 050020000
0000345 VELGJ 050020000
0000346 MFLOWJ 260000000
0000347 MFLOWJ 270000000
0000348 MFLOWJ 320000000
0000349 MFLOWJ 340000000
0000350 VOIDG 100010000
0000351 VOIDG 100020000
0000352 VOIDG 100030000
0000353 VOIDG 060030000
0000354 VOIDG 060020000
0000355 VOIDG 050010000
0000356 VOIDG 050010000
0000357 VOIDG 040070000

```

(27)

```

1611 0000358 VOIDG 040060000
1612 0000359 VOIDG 040050000
1613 0000360 VOIDG 040040000
1614 0000361 VOIDG 040030000
1615 0000362 VOIDG 040020000
1616 0000363 VOIDG 040010000
1617 *000364 VOIDG 030010000
1618 *000365 VOIDG 020020000
1619 *000366 VOIDG 020010000
1620 *000367 VOIDG 010010000
1621 *000368 VOIDG 011010000
1622 0000369 VOIDG 071010000
1623 0000370 VOIDG 110010000
1624 0000371 VOIDG 111010000
1625 0000372 VOIDG 112030000
1626 0000373 VOIDG 112020000
1627 0000374 VOIDG 112010000
1628 0000375 VOIDG 120010000
1629 *000376 VOIDG 130040000
1630 *000377 VOIDG 130030000
1631 *000378 VOIDG 130020000
1632 0000379 VOIDG 130010000
1633 0000380 VOIDG 131010000
1634 *000381 MFLWJ 350000000
1635 0000382 MFLWJ 370000000
1636 *000383 HTEMP 003000109
1637 *000384 HTEMP 003000209
1638 *000385 HTEMP 003000309
1639 *000386 HTEMP 003000409
1640 *000387 HTEMP 003000509
1641 *000388 HTEMP 003000609
1642 *000389 HTEMP 003000709
1643 0000390 MFLWJ 111030000
1644 0000391 VOIDG 400010000
1645 0000392 CNTRLVAR 1
1646 *****
1647 * FEED WATER LINE JUNCTION (2# NOZZLE)
1648 *
1649 * C410 SNGLJUN
1650 * 40000000 111010000 1.924-3 0.0 0.0 0100
1651 * 1 0.0 0.0 0.0
1652 *****
1653 * CONTROL COMPONENT FOR WATER LEVEL AT UPPER DOWNCOMER
1654 *****
1655 * CARD NAME TYPE S I-V. FLAG *
1656 * 20500100 WL4 SUM 1.0 1.0 1 *
1657 *
1658 * DATA CARD *
1659 * SUM Y=S*(A0+A1*V1+A2*V2+....) *
1660 * C(A0) C(A1) VARIABLE(VI) COMPONENT(VI) *
1661 * 20500101 0.0 0.348 VOIDF 080010000 *
1662 * 20500102 0.2817 VOIDF 070010000 *
1663 * 20500103 0.222 VOIDF 071010000 *
1664 * 20500104 0.73 VOIDF 110010000 *
1665 * 20500105 0.1634 VOIDF 111010000 *
1666 * 20500106 0.35 VOIDF 112030000 *
1667 *
1668 *

```