

JAERI-M  
7037

LOFT (L1-2) 実験の RELAP-4 J  
コードによる解析

1977年4月

田坂 完二・早田 邦久・斯波 正誼・神永 文人

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

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

LOFT(L1-2)実験のRELAP-4Jコードによる解析

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

田坂完二・早田邦久・斯波正誼・

神永文人

(1977年3月14日受理)

LOFTのL1-2実験の解析をRELAP-4Jコードにより行った。L1-2実験は炉心を抵抗体で模擬しECCSを作動させない最も単純な等温ブローダウン実験であり、以後のLOCA実験の基礎となるものである。解析の結果以下の点が明らかとなった。(1)系の圧力の時間変化は実験結果とよく一致した。系の圧力の時間変化に大きな影響を及ぼす因子は(a)破断ループのポンプ模擬体、蒸気発生器模擬体、およびノズルの流動抵抗、(b)ダウンカメラおよび蒸気発生器入口側ボリュームの水位、(c)ダウンカメラ構造体による水の加熱、等である。(2)加圧器の圧力は実験結果と比較して速く低下する。これはサージラインの流動抵抗が小さいためと考えられ、この点に関しては解析と測定の両面からさらに検討を加える必要がある。(3)低温側配管における密度の時間変化は実験結果とよく一致したが、高温側配管においては実験結果との不一致が大きい。不一致の原因は主に高温側配管においては流量が小さく流れの不均質性が強いことによっていると考えられる。(4)等温ブローダウンにおいてはポンプ特性が解析結果に及ぼす影響は小さい。しかし核加熱実験においては蒸気発生量の差をとりして大きな影響を及ぼすと考えられ、ポンプ特性の測定と計算モデルの改良が必要である。

Analysis of LOFT (L1-2) Experiment by Code RELAP-4J

Kanji TASAKA, Kuniyoshi SODA, Masayoshi SHIBA  
and Humito KAMINAGA

Division of Reactor Safety, Tokai, JAERI

(Received March 14, 1977)

An analysis of the results in LOFT L1-2 LOCE (Loss of Coolant Experiment) was made by the computer code RELAP-4J. The L1-2 experiment is a simple isothermal blowdown test with a core simulator and no ECC activation. It provides the basis for future LOCE with a nuclear core and ECC activation. The results of the analysis lead to the following conclusions.

- (1) The calculated system pressure transient agrees well with experiment. Primary controlling factors for the calculation are (a) flow resistances of the steam generator simulator, pump simulator and discharge nozzle in the broken loop, (b) mixture level in the downcomer and inlet volume of the operating loop steam generator, and (c) stored heat of the downcomer structure.
- (2) The pressurizer pressure decreases rapidly, compared with experiment, possibly because the flow resistance in the surge line is smaller than the actual one. Further experiment and analysis are necessary in this respect.
- (3) The calculated density transient in the cold leg agrees well with experiment. Agreement is not good in the hot leg, however. The discrepancy is possibly caused by the non-homogeneous flow of coolant in the hot leg due to low flow rate.
- (4) Effect of the pump characteristics on analytical result is insignificant in the isothermal test. However, in the future nuclear test, the effect will be significant because of large steam generation in the core, so measurement of the pump characteristics and improvement of the pump model are necessary.

## SUMMARY

Experimental results of LOFT L1-2 LOCE (Loss of Coolant Experiment) were analyzed by the computer code RELAP-4J (JAERI's modified version of RELAP-4 mod 3). L1 series experiments of LOFT LOCE are all isothermal with a core simulator except L1-5 in which a nuclear core will be used at cold state. The results of L1 series are expected to provide base line data for future nuclear experiment. Among scheduled five L1 series tests, L1-2 is only isothermal blowdown test without ECC injection and provides basic information on primary coolant behavior in the LOFT system. Thus the analysis of L1-2 experiment must be performed as carefully as possible in order to evaluate the experiment as well as code calculations.

Objectives of the present study are as follows; (1) to collect all the informations on LOFT experiment required for the analysis including geometry and experimental conditions; (2) to point out the problems associated with input preparation for a computer code and calculation model; (3) to show future direction of LOFT analysis; and (4) to propose improvements on instrumentations for future experiment.

Conclusions

The present analysis of L1-2 lead to the following conclusions through comparison of calculated results with experimental data.

- (1) Calculated system pressure agreed quite well with experimental data. Primary governing factors of pressure transient are (a) flow resistance in the pump simulator, the steam generator simulator and the discharge nozzle in the blowdown loop, (b) mixture level in the downcomer and the operating loop steam generator inlet side volume, (c) stored heat of the downcomer

structures.

- (1-a) Form loss coefficient of the pump simulator was determined based on the model experiment and that of the steam generator simulator was obtained by adding form loss coefficients for sudden expansion and sudden contraction. These form loss coefficients were found to be adequate since differential pressure measurement across the pump simulator and the steam generator simulator agreed satisfactorily with calculated pressure drop using these form loss coefficients. It was necessary to treat the vessel side discharge nozzle of the blowdown loop as an independent volume in order to accurately account for friction loss inside the nozzle. Computed pressure assuming the nozzle as a junction resulted in faster pressure decrease due to no friction assumed in the nozzle.
- (1-b) Discharge flow quality through the vessel side nozzle increased and discharge flow rate decreased as mixture level in the downcomer reached to the top edge of the cold leg piping in the broken loop. System pressure assuming mixture level in the downcomer was lower as compared with that for without mixture level for earlier portion of blowdown due to more residual water in the system. Density in the cold leg of the broken loop was influenced by the mixture level in the downcomer. Mixture level in the upper plenum on the other hand had influence on discharge flow rate, quality, density and other properties in the hot leg of the broken loop, but

the effect on system pressure was not significant. This is because large flow resistance exists between the loop side discharge nozzle and the upper plenum due to the presence of the pump simulator. In case of hot leg break however, system pressure would be influenced by the mixture level in the upper plenum and the mixture level in the downcomer would have little effect on system pressure. The mixture level in the inlet volume of the operating loop steam generator restricts steam flow passing through the steam generator and thus system pressure is maintained higher by limiting the discharge flow of liquid in the operating loop through the vessel side break. The steam generator has large height and acts as a water divide in the loop. The flow from the heighest part of the steam generator to the cold leg piping remained normal direction throughout blowdown.

- (1-c) Since the downcomer has narrow gap, large structural volume and large heat transfer surface area, the downcomer generates large amount of steam by releasing its stored heat to coolant and keeps system pressure higher. Better treatment of contribution from the downcomer heat slab can not be made until the calculation model is modified such that heat transfer coefficients corresponding to steam phase and liquid phase be treated separately. The effect of heat slab other than in the downcomer was negligible.
- (2) Calculated pressure in pressurizer dropped faster than experimental data. It was concluded that flow resistance in the

pressurizer surge line was accounted less than actual and thus coolant was discharged faster. Although all the hydraulic resistance in the surge line was taken into account in the analysis, further investigation of the resistance will be needed. In addition, it is recommended to make flow resistance be measured at steady flow condition. Coolant flow from pressurizer to primary coolant system plays an important role in determining coolant condition between the upper plenum and the steam generator. When liquid level in the pressurizer falls to the hot leg piping, steam is directly discharged into the primary system and pressurizer pressure propagates into the primary system. It leads to flow reversal from the upper plenum to the core and thus the upper plenum liquid level is changed. Further drop in pressurizer pressure results in the loss of pressurizing effect and depressurization rate of system pressure increases.

- (3) Calculated fluid temperature was very close to measured value until 30 seconds after break. As the flow rate decreases, calculated temperature deviates from data. The major reasons for the deviations are (a) error involved in calculating pressure in suppression tank and (b) heating of thermocouples by hot wall.

(3-a) Equilibrium pressure in the suppression tank differs by approximately 23 psi and corresponding error in temperature is approximately 30°F. In the suppression tank, header and downcomer, air volume presents and rigorous treatment is impossible in the present RELAP-4J. It is relatively simple to modify the input for



the suppression tank such that the equilibrium pressure in effect be the same as data. The effect of the suppression tank model is not significant except for fluid temperature calculation.

(3-b) If heat slab has significant effect of heating liquid, analysis should consider heat slab. If measured temperatures by thermocouples are higher due to hot wall presence than what liquid temperature would indicate, method of temperature measurement must be modified. In the analysis considering heat slabs for almost all the system components, calculated fluid temperature differed little from the analysis in that heat slab was considered only in the downcomer although the calculation was made only up to 32 seconds after break. It was therefore concluded that the difference in the temperature may be due to inadequate measurement.

(4) Density in the cold leg piping showed good agreement with data. However density in the hot leg piping differed from data. Controlling factors for density are boiling initiation, mixture level and nonhomogeneity of flow at low flow rate.

(4-a) Density in the cold leg piping of the broken loop agreed extremely well with experimental results. This is because flow rate in the cold leg is large enough to assure that homogeneous flow model in the calculation is adequate. Good agreement among the three different directional density measurements was also observed.

(4-b) Density in the pump suction side and the cold leg of the operating loop was very close to experimental data.

However deviation was observed beyond 7 seconds after break due to the decrease in flow rate and due to the change in flow pattern from homogeneous to non homogeneous. Density differed depending on the direction of the measurement.

(4-c) Density in the hot leg piping of the broken loop was strongly dependent on the direction of the measurement after boiling initiation and it is impossible to predict density by the homogeneous flow model. However calculated results fall in the range of three directional measurements of density and it qualitatively explains density transient in the hot leg.

(4-d) Calculated density in the hot leg of the operating loop sharply dropped due to flow reversal. Data also indicates similar drop although the timing is about 2 seconds delayed. After 10 seconds from the break, directional dependency of density measurement becomes large. Calculated results however qualitatively predict data.

(5) Quality and flow rate in the cold leg piping and the hot leg piping of the broken loop were in good qualitative agreement with data. However quantitative agreement was poor.

Homogeneous flow assumption was made in the calculation.

Since calculated pressure agreed well with measured value, calculation of flow rate and quality was considered accurate. The size of the piping of LOFT system is relatively large and thus data obtained from the momentum flux measurement becomes inaccurate when nonhomogeneous effect can not be negligible.

Error also should be expected in calculating flow rate from differential pressure since form loss coefficient must be kept constant regardless of flow pattern. Discrepancy exists between the flow rates calculated from momentum flux and differential pressure.

- (6) Pump characteristics has influence on the core inlet flow rate. In case of isothermal blowdown however, discharge flow rate, system pressure, and fluid density are little affected by the pump characteristics. In case of L2 series experiment with a nuclear core on the other hand, significant effect would be observed during blowdown due to steam generation in the core. Therefore measurement of the pump characteristics as well as improvement of the pump model are necessary for future experiment series.

#### Recommendations for future analysis and experiment

Following recommendations and proposals are made during the course of the analysis.

- (1) Recommendations for input data preparation.
  - (a) Noding of case (18) and component dimension summarized in Table 3.1 are recommended for use.
  - (b) Form loss coefficients shown in table 3.3 are to be used.
  - (c) Initial pressure and temperature distribution in the system should be further verified with more accurate measurement. However if not available, differential pressure measurement must be used for estimating initial pressure distribution. For the case of same flow rate as L1-2, pressure distribution used in the present analysis is recommended for use.

- (2) Future modifications for of analytical model.
  - (a) Slip between steam and liquid must be taken into account in analysis.
  - (b) LOFT pump characteristic must be obtained experimentally and modeled into the pump model.
  - (c) Heat transfer model in volume associated with mixture level must be modified to account for separate heat transfer coefficients in steam and liquid.
- (3) Proposal for additional instrumentations.
  - (a) Measurement of pressure drop in the broken loop should be made by circulating coolant at the flow rate corresponding to the discharge flow rate of initial portion of blowdown.
  - (b) Flow resistance in pressurizer surge line should be measured.
  - (c) Separate effect test for the LOFT pump should be performed to obtain pump characteristic curve.
  - (d) Following instrumentations as listed in Section 6.1, article (3) are desirable either by improving present instrumentations or developing new technique; (i) flow rate, differential pressure and density in pressurizer surge line, (ii) core inlet and outlet flow rate, (iii) mixture level in operating loop steam generator, (iv) liquid level in pressurizer, (v) upper plenum liquid level, (vi) temperature distribution in the broken loop.

## 目 次

Summary	
1. はじめに .....	1
2. L1 - 2 実験の概要 .....	4
3. 計算モデル .....	7
3.1 RELAP 4 の概要 .....	7
3.2 ボリュームの決め方 .....	7
3.3 ジャンクションと流路形状抵抗係数の決め方 .....	8
4. 解析結果とその検討 .....	39
4.1 解析ケース .....	39
4.2 破断ループの形状損失係数の効果 .....	47
4.3 ポンプ特性が解析結果に及ぼす影響 .....	49
4.4 水位の存在が解析結果に及ぼす影響 .....	50
4.5 ボリューム構成が解析結果に及ぼす影響 .....	51
4.6 熱源構造体が解析結果に及ぼす影響 .....	52
4.7 加圧器の取扱い方が解析結果に及ぼす効果 .....	53
4.8 解析結果 .....	55
4.9 実験結果と解析結果の比較検討 .....	61
5. 結 論 .....	120
6. 今後の実験及び解析に対する指針と提言 .....	123
6.1 問題点の整理 .....	123
6.2 解析の指針及び実験への提言 .....	125
6.3 今後の方針 .....	125
謝 辞 .....	126
参考文献 .....	126
Appendix 1 Listing of Input Data for Case 9 .....	128
Appendix 2 Listing of Input Data for Case 12 .....	132
Appendix 3 Listing of Input Data for Case 15 .....	135
Appendix 4 Listing of Input Data for Case 18 .....	139

CONTENTS

Summary

1. Introduction
2. General Description of L 1 - 2 Experiment
3. Calculation Model
  - 3.1 General Description of RELAP 4
  - 3.2 Determination of Volumes
  - 3.3 Determination of Junctions and Form Loss Coefficients
4. Results and Discussion of Analysis
  - 4.1 Description of Cases for Analysis
  - 4.2 Effect of Form Loss Coefficients in the Broken Loop
  - 4.3 Effect of Pump Characteristics
  - 4.4 Effect of Mixture Level
  - 4.5 Effect of Nodings
  - 4.6 Effect of Heat Slab
  - 4.7 Effect of Pressurizer Modeling
  - 4.8 Results of Analysis
  - 4.9 Comparison of Experimental Results and Analysis
5. Conclusions
6. Recommendations for Future Experiment and Analysis
  - 6.1 Classification of Associated Problems with LOFT Experiment and Analysis
  - 6.2 Recommendations for Analysis and Proposals for Experiment
  - 6.3 Future Direction of Analysis

Acknowledgement

References

List of Tables

- Table 1.1 LOFT Experiment Schedule
- Table 2.1 LOCE L1-2 Initial Conditions
- Table 3.1 Volume Data for LOFT Analysis
- Table 3.2 Corresponding Instrumentations to Volume for LOFT Analysis
- Table 3.3 Junction Data Used for Analysis
- Table 4.1 Parametric Analysis of LOFT (L1-2)
- Table 4.2 Operating Loop Pressure at Cold Leg with Different Pump Data
- Table 4.3 Flow Rate at Operating Loop Cold Leg with Different Pump Data
- Table 4.4 Flow Rate at Core Inlet with Different Pump Data
- Table 4.5 Pressure at Operating Loop Cold Leg with and without Mixture  
Level in Upper Plenum
- Table 4.6 Saturation Times and Movements of Mixture Levels in Case 18

List of Figures

- Fig. 2.1 LOFT Primary Coolant System Configuration for  
LOCE L1-2
- Fig. 3.1 Node and Junction Representation for LOFT  
Analysis; Case A and Case B
- Fig. 3.2 Node and Junction Representation for LOFT  
Analysis; Case C-Revised noding
- Fig. 3.3 Node and Junction Representation for LOFT  
Analysis; Case D and Case E (Reference Case)
- Fig. 3.4 Volume 1 Details
- Fig. 3.5 Volume 2 Details
- Fig. 3.6 Volume 3 Details
- Fig. 3.7 Volume 6 Details
- Fig. 3.8 Volume 7 Details
- Fig. 3.9 Volume 8 Details
- Fig. 3.10 Volume 9 Details
- Fig. 3.11 Volume 10 Details
- Fig. 3.12 Volume 11,12,13 and 14 Details
- Fig. 3.13 Volume 15 Details
- Fig. 3.14 Volume 16 Details
- Fig. 3.15 Volume 17 and 18 Details
- Fig. 3.16 Volume 19 Details
- Fig. 3.17 Volume 20 Details
- Fig. 3.18 Volume 21 and 27 Details
- Fig. 3.19 Volume 22 Details
- Fig. 3.20 Volume 23 and 28 Details
- Fig. 3.21 Volume 24 Details
- Fig. 3.22 Volume 25 Details



- Fig. 4.1 Steam Generator Simulator
- Fig. 4.2 Pump Simulator
- Fig. 4.3 Pressure Transient at Operating Loop Cold Leg  
with Different Form Loss Coefficients for SG and  
Pump Simulators
- Fig. 4.4 Pressure at Operating Loop Cold Leg as a Function of  
Form Loss Coefficients for SG and Pump Simulators
- Fig. 4.5 Pressure Transient at Operating Loop Cold Leg with  
and without Mixture Level in Downcomer
- Fig. 4.6 Break Flow from Vessel with and without Mixture Level  
in Downcomer
- Fig. 4.7 Break Quality from Vessel with and without Mixture Level  
in Downcomer
- Fig. 4.8 Average Density at Blowdown Loop Cold Leg with and without  
Mixture Level in Downcomer
- Fig. 4.9 Pressure Transient at Operating Loop Cold Leg with  
Different Nodings
- Fig. 4.10 Effects of Heat Slabs for Pressure Transient at Operating  
Loop Cold Leg
- Fig. 4.11 Effects of Pressurizer Input Data for Pressure Transient  
in Pressurizer
- Fig. 4.12 Effects of Discharge Coefficient at Surge Line Outlet  
for Pressure Transient in Pressurizer
- Fig. 4.13 Effects of Surge Line Data for Mixture Level Transient  
in Pressurizer
- Fig. 4.14 Effects of Pressurizer Data for Mixture Level  
Transient in Pressurizer
- Fig. 4.15 Flow at Pressurizer Surge Line Outlet with Different  
Discharge Coefficients

- Fig. 4.16 Mixture Level in Upper Plenum with Different Discharge Coefficients at Surge Line Outlet
- Fig. 4.17 Pressure Transient at Operating Loop Cold Leg with Different Discharge Coefficients at Surge Line Outlet
- Fig. 4.18 Density at Operating Loop Hot Leg with Different Discharge Coefficients at Surge Line Outlet
- Fig. 4.19 Density at Blowdown Loop Hot Leg with Different Discharge Coefficients at Surge Line Outlet
- Fig. 4.20 Density at Operating Loop Cold Leg with Different Discharge Coefficients at Surge Line Outlet
- Fig. 4.21 Density at Blowdown Loop Cold Leg with Different Discharge Coefficients at Surge Line Outlet
- Fig. 4.22 Calculated Flows at Breaks, and Cold and Hot Legs of Blowdown Loop
- Fig. 4.23 Calculated Qualities at Breaks, and Cold and Hot Legs of Blowdown Loop
- Fig. 4.24 Calculated Flows from Hot Leg to Break of Blowdown Loop
- Fig. 4.25 Calculated Qualities from Hot Leg to Break of Blowdown Loop
- Fig. 4.26 Effects of Reflood Assisting Bypass to Flows at Cold Leg and Break of Blowdown Loop
- Fig. 4.27 Effects of Reflood Assisting Bypass to Flows at Hot Leg and Break of Blowdown Loop
- Fig. 4.28 Calculated Mixture Level of Downcomer
- Fig. 4.29 Calculated Mixture Level of Upper Plenum
- Fig. 4.30 Calculated Mixture Level of Pressurizer
- Fig. 4.31 Calculated Mixture Level of SG Inlet-Side Volume
- Fig. 4.32 Calculated Pressure Transients of Pressurizer and Operating Loop Hot Leg

- Fig. 4.33 Calculated Densities at Cold Legs of Blowdown and Operating Loops
- Fig. 4.34 Calculated Densities at Hot Legs of Blowdown and Operating Loops
- Fig. 4.35 Calculated Flows at Four Legs of Vessel
- Fig. 4.36 Calculated Qualities at Four Legs of Vessel
- Fig. 4.37 Flow Balance in Upper Plenum
- Fig. 4.38 Effect of Pressurizer to Flows of Operating Loop
- Fig. 4.39 Calculated Quality of Flow at PR Surge Line Outlet
- Fig. 4.40 Flow Balance in SG Inlet-Side Volume
- Fig. 4.41 Calculated Flows from Top of Steam Generator to Cold Leg of Operating Loop
- Fig. 4.42 Calculated Qualities of SG Outlet Volume, Pump and Cold Leg of Operating Loop
- Fig. 4.43 Calculated Flows at Operating Loop Cold Leg and Downcomer Outlet
- Fig. 4.44 Calculated Flows from Downcomer Outlet to Core Outlet
- Fig. 4.45 Calculated Qualities at Downcomer, Lower Plenum, Core and Upper Plenum
- Fig. 4.46 Calculated Pressure Transient at Suppression Tank
- Fig. 4.47 Calculated pressure transient at operating loop hot leg is compared with experimental results.
- Fig. 4.48 Calculated pressure transient at pump inlet is compared with experimental results.
- Fig. 4.49 Calculated pressure transient at operating loop cold leg is compared with experimental results.
- Fig. 4.50 Calculated pressure transient at pressurizer is compared with experimental results.

- Fig. 4.51 Calculated pressure transient at blowdown loop hot leg is compared with experimental results.
- Fig. 4.52 Calculated pressure transient at pump simulator inlet is compared with experimental results.
- Fig. 4.53 Calculated pressure transient at blowdown loop cold leg is compared with experimental results.
- Fig. 4.54 Calculated pressure transient at nozzle of blowdown loop is compared with experimental results.
- Fig. 4.55 Calculated pressure transient at suppression tank is compared with experimental results.
- Fig. 4.56 Calculated fluid temperature transient at operating loop hot leg is compared with experiment.
- Fig. 4.57 Calculated fluid temperature transient at operating loop cold leg is compared with experiment.
- Fig. 4.58 Calculated fluid temperature transient at blowdown loop hot leg is compared with experiment.
- Fig. 4.59 Calculated fluid temperature transient at blowdown loop cold leg is compared with experiment.
- Fig. 4.60 Calculated temperature transient in pressurizer is compared with experiment.
- Fig. 4.61 Calculated pressure losses at SG and pump simulators are compared with experiment.
- Fig. 4.62 Calculated mixture level transient in pressurizer is compared with experiment.
- Fig. 4.63 Calculated density at operating loop hot leg is compared with experiment.
- Fig. 4.64 Calculated density at operating loop pump inlet is compared with experiment.

- Fig. 4.65 Calculated density at operating loop cold leg is compared with experiment.
- Fig. 4.66 Calculated density at blowdown loop hot leg is compared with experiment.
- Fig. 4.67 Calculated density at blowdown loop cold leg is compared with experiment.
- Fig. 4.68 Relation of Gamma-Ray Source and Detector to Pipe
- Fig. 4.69 Comparison of Experiment and Analysis of Average Density at Operating Loop Hot Leg
- Fig. 4.70 Comparison of Experiment and Analysis of Average Density at Operating Loop SG Outlet
- Fig. 4.71 Comparison of Experiment and Analysis of Average Density at Operating Loop Cold Leg
- Fig. 4.72 Comparison of Experiment and Analysis of Average Density at Blowdown Loop Hot Leg
- Fig. 4.73 Comparison of Experiment and Analysis of Average Density at Blowdown Loop Cold Leg
- Fig. 4.74 Comparison of Experiment and Analysis of Static Quality at Operating Loop Hot Leg
- Fig. 4.75 Comparison of Experiment and Analysis of Static Quality at Operating Loop SG Outlet
- Fig. 4.76 Comparison of Experiment and Analysis of Static Quality at Operating Loop Cold Leg
- Fig. 4.77 Comparison of Experiment and Analysis of Static Quality at Blowdown Loop Hot Leg
- Fig. 4.78 Comparison of Experiment and Analysis of Static Quality at Blowdown Loop Cold Leg
- Fig. 4.79 Comparison of Experiment and Analysis of Mass Flow per System Volume at Blowdown Loop Cold Leg

Fig. 4.80 Comparison of Experiment and Analysis of Mass Flow  
per System Volume at Blowdown Loop Hot Leg

Fig. 4.81 Comparison of Experiment and Analysis of Mass Flow  
per System Volume at Pressurizer Outlet

## 1. はじめに

軽水炉の安全性を評価するにあたっては、冷却材喪失事故（LOCA）を想定し、非常冷却系（ECCS）が設計通りに作動することを示す必要がある。<sup>[1][2]</sup> 一般には、LOCA解析用の計算コード<sup>[3]</sup>を用いて、燃料棒最高被覆管温度が、定められた、しきい値を越えないことを示さねばならない。従って、計算コードの精度が、計算結果の予測性能を左右し、安全性評価の精度をも左右している。このような計算コードでは、原子炉でLOCA時におこり得る冷却材の挙動、冷却材と燃料棒間の熱伝達などを想定し、それぞれ妥当と思われる物理モデルを組み合わせて解いている。既存の物理モデルが利用できない場合には、分離効果試験等で得られた結果を用いる。しかし個別に得られたモデルを組み合わせたもので、LOCAのように、原子炉の各部でおきる現象が相互に関連しあっている現象を、精度よく予測できるかどうかは、総合実験によって、判定する必要がある。また、総合実験とコードの計算結果を比較することにより計算コードのモデルの不備な点を指摘し、コードの精度向上に役立てることができる。さらに総合実験では、個別試験では得られなかった、新たな現象が出現する可能性があり、その場合には、計算コードに、新しくモデルを組み込む必要が出てくる。従って、可能な限り、実炉のLOCAの本質を捉えた総合的な実験を行うことが、計算コードの予測性の判定及び精度の向上に不可欠な要素である。

このような総合実験を行うことを目的としたのが、LOFT（Loss of Fluid Test）<sup>[4][5]</sup>計画である。LOFT計画には、電気加熱の模擬燃料棒を用いた小規模なセミスケール装置による実験と、核燃料を装荷した55MWの実験用加圧水型原子炉（PWR，LOFT炉）を用いた実験とがある。いずれも4×4PWRを、健全ループ1系統と、蒸気発生器とポンプの抵抗のみを模擬した破断ループ1系統で代表している。セミスケール装置のうち、MOD-1と呼ばれるものは、LOFT炉を約 $\frac{1}{40}$ に縮小したものである。セミスケール実験は、実験が容易であるために、広汎な実験条件で実験を行うことができ、LOFT実験に先行した実験を行うことによりLOFT実験のための実験条件を決定するデータを得ることができる。さらに、計算コードの予測性についても、予かじめ検討しておくことができる。また、同一条件で実験を行えば、縮尺効果（Scaling effect）についてのデータを得ることができ、実炉へ外挿する可能性について示唆を得られる。現在まで、セミスケールMOD-1実験シリーズは、LOFTのL1及びL2実験シリーズに対応して、S-01<sup>[6]</sup>，S-02<sup>[7][8]</sup>シリーズ実験を終了している。これらの結果は、LOFT実験の結果を予想し、計算コードの予測性を判定する上で、重要なデータと言える。

一方、LOFT実験は、実炉を熱出力に応じて、約 $\frac{1}{50}$ の体積比に縮小したLOFT炉による実験で、セミスケール実験では得ることのできない、LOCA時の核燃料棒の挙動についてのデータを得ることができる。さらに計算コードのモデルについても、規模の大きい装置への適応の妥当性について、データとの比較が可能である。

LOFT実験は、Table 1.1 に示す実験シリーズが予定されていて、このうち、L1シリーズのL1-1，L1-2，L1-3，L1-3Aまでが終了している。L1シリーズはL1

- 5を除き、核燃料を装荷せず、LOFT炉における冷却材の挙動のみを調べる実験で、今後の核燃料を装荷したL2シリーズ以降の実験シリーズと比較するための基礎となるものである。従って、L1シリーズ実験を精度よく解析することが、今後の実験解析の為の基盤となる。なかでもL1-2実験は、炉心抵抗を核燃料装荷の場合と同じにした上ECCSを作動させない最も単純なLOCA実験(LOCE)であり、L1-2の解析が、今後の解析に必要な入力データを作成するための基礎となる。従って、L1-2の解析を詳細に行うことは、LOFT炉の冷却材挙動と、計算コードの予測性を検討する上で、非常に重要である。

以上の主旨に沿って、今回のL1-2解析では、LOFT炉の寸法、実験条件等を、できるだけ正確に調べ、LOFT炉及びL1-2実験に関する情報を整理した上で、RELAP4<sup>[9]</sup>及びRELAP4J<sup>[10]</sup>を用いた解析を行った。そして解析結果を実験データ<sup>[11]</sup>と比較し、計算コード入力作成上の問題点、及び、計算モデル上の問題点を指摘し、今後の解析の方針を示した。また、本解析の過程で明らかになった、計測の不備な点もあわせて指摘した。これらの結果は、L2シリーズ以後の実験解析のための基礎データを提供するものである。



Table 1.1 LOFT Experimental Schedule

Series No.	RUN	Experimental Specification	Expected Date
L1 (Isothermal Test)	1	100% HLB. System operating test, ECC operation, 93 ata	1976.3
	2	200% CLB. No ECC injection, normal operating condition	1976.5
	3	200% CLB, HPIS LPIS operation, ACC failure	1976.6
	3A	Repeat of L1-3, ACC injection into lower plenum	1976.7
	4	200% CLB, ECC injection into cold leg	1977.4
	5	Nuclear core at cold state, same as L1-4	1978.5
L2 (Low power) LOCE	1	CHF Temperature spike observation	(1978.12)
	2	Maintain Film boiling ( 1000°F)	1979 ~
	3	Maintain Film boiling ( 1500°F)	"
	4	Linear power of 15×15 PWR simulation	"
	5	Repeat of L2-4	"
L3	ND	Full power LOCE : Normal operating condition	"
L4	ND	Full power LOCE : Degraded condition	"
L5	ND	Full power LOCE : Alternate ECC	"

Note : CLB — cold leg break

HLB — hot leg break

ND — not determined

## 2. L1-2 実験の概要

L1-2 実験は、LOFT 炉の非核実験シリーズ(L1 シリーズ)の第2回目の実験で、炉心には核燃料体の代わりに、抵抗オリフィスを用いた LOCA 実験(LOCE)である。

LOFT 炉の概要を第1図に示す。

LOFT 炉は、4×4 PWRの健全3ループを模擬した、健全ループ1系統と、蒸気発生器及びポンプの抵抗のみを模擬した破断ループ1系統から構成されている。健全ループには、ポンプを2台並列に置いている。ECCSは、高圧注入系(HPIS)、低圧注入系(LPIS)、蓄圧注入系(ACC)があるが、L1-2 実験では、使用しない。

L1-2の実験初期条件をTable 2.1に示す。実験は、200%コールドレグ破断で、実験初期条件到達後、約6時間の定常運転を行った後、実験を開始する。ブローダウン終了後、ACCを作動させ、ホットウォール効果試験を行っているが、本解析では、対象としない。この実験で計測したデータは、圧力、温度、差圧、流量、ボイド率など約300点で、LOCE時の冷却材挙動を推定するのに用いる。

Table 2.1 LOCE L1-2 INITIAL CONDITIONS

Parameter	EOS Specified Value	Measured Value
<b>Primary Coolant System</b>		
Flow rate	$2.15 \pm .05 \times 10^6 \text{bm/hr}$	$2.12 \times 10^6 \text{bm/hr}$
Pressure	$2250 \pm 25 \text{ psig}$	2255 psig
Temperature	$540 \pm 2^\circ\text{F}$	540°F
<b>Pressurizer</b>		
Steam volume	$11.6 \pm 3.5 \text{ ft}^3$	$12.9 \text{ ft}^3$
Water volume	$22.4 \pm 3.5 \text{ ft}^3$	$21.1 \text{ ft}^3$
Water temperature	Not specified	654°F(vapor) 643°F(liquid)
Pressure	$2250 \pm 15 \text{ psig}$	2255 psig
<b>Steam Generator Secondary</b>		
Water volume	Not specified	-----
Water level	$116 \pm 1 \text{ inch}$	116 in.
Water temperature	Not specified	-----
Pressure	Not specified	921 psig
<b>Suppression Tank</b>		
Gas volume	$1974 \pm 28 \text{ ft}^3$	$1974 \text{ ft}^3$
Liquid volume	$1036 \pm 28 \text{ ft}^3$	$1036 \text{ ft}^3$
Downcomer submergence	$16 \pm 1 \text{ in. [a]}$	$17 \text{ in. [a]}$
Water temperature	$171 \pm 4^\circ\text{F}$	168°F
Pressure	$15 \pm 2 \text{ psig}$	13 psig

[a] Based on average submergence of four downcomers.

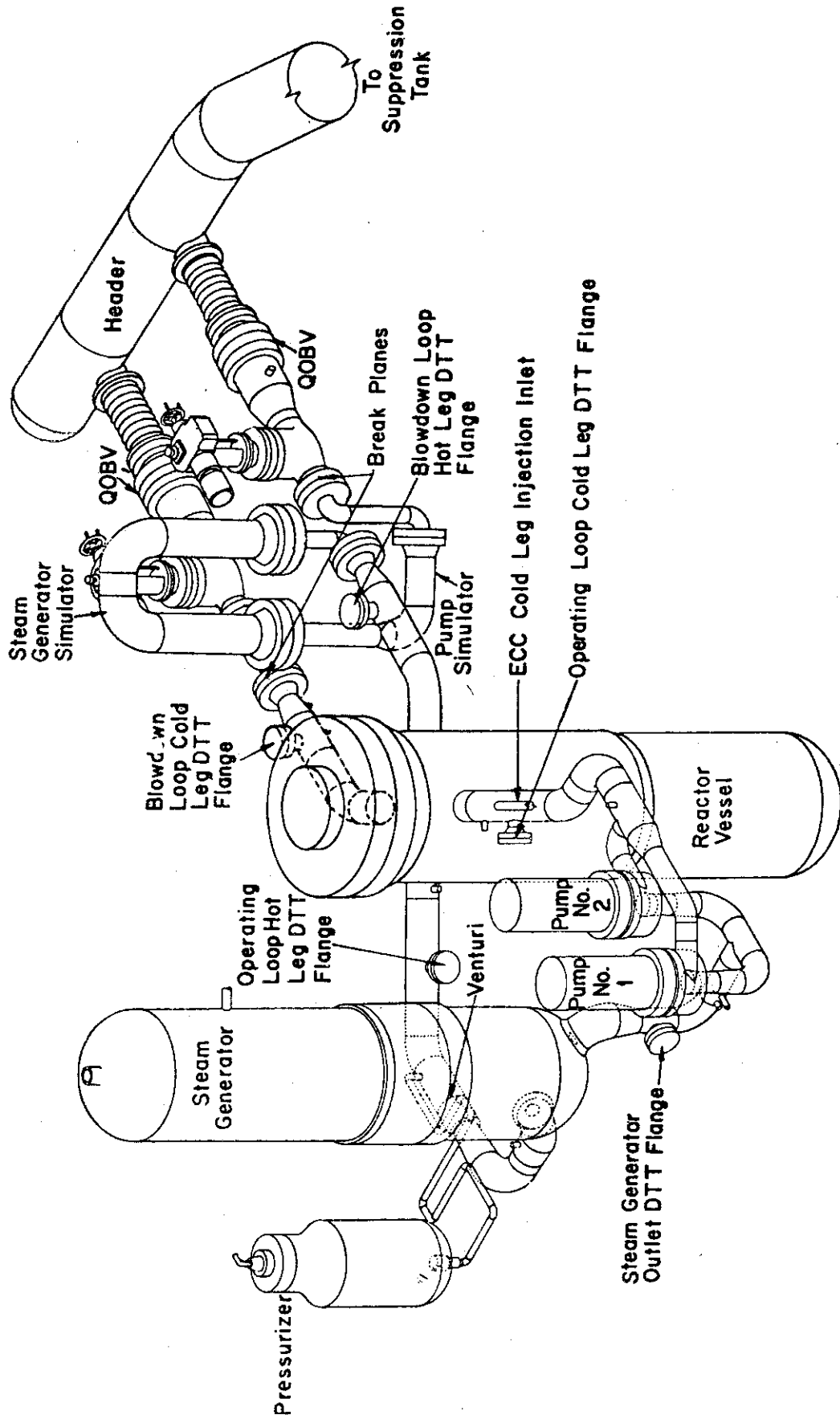


Fig. 2.1 LOFT Primary Coolant System Configuration for

LOCE L1-2

### 3. 計算モデル

#### 3.1 RELAP 4の概要

RELAP 4<sup>[9]</sup>は、米国で開発された、軽水炉冷却喪失事故時の冷却材の挙動、燃料温度の挙動を解析するための計算コードである。現在も、ひき続き改良がすすめられており、いくつかのVersionがある。本解析で使用したRELAP 4は、MOD 3と呼ばれるVersionのRELAP 4に、Wilsonの式、 $C_D$ 関係式を使用できるオプション、及び、MKS単位系への変換を行うオプションを加えたRELAP 4J<sup>[10]</sup>である。

RELAP 4では、2相流の基礎方程式をある領域で積分した形で解いている。従って、計算値は、積分領域での平均的な値を表わすことになる。流動については、隣り合った領域相互間の質量、運動量、エネルギーのやりとりを計算し、全体のバランスが得られるようにする。このように、RELAP 4では、対象となるシステムを、積分領域(ボリューム)に分割し、入力データ(体積、流路断面積、高さ、相対位置、初期圧力、初期温度、初期クオリティなど)を与えることが必要である。さらに、積分領域の接続箇所をジャンクションとして、そこでの流路断面積等のデータを与えねばならない。これらの入力データを与えた上で、種々の条件、例えば破断口径、破断位置等、解析の対象となる事故に関する情報を入力として、計算を行う。

RELAP 4で用いている2相流に関する基礎方程式は、飽和2相流で、均質流モデルである。但し、ボリューム内で液面の存在を仮定するオプションを使用する場合には、液面を抜ける気泡の離脱速度及び、液面下にある気泡分布を与えることができる。従って、均質流モデルまたは、気泡分布モデルが妥当でない流動パターンがあると、RELAP 4の計算結果が、実際の値と異なる場合があり得る。このことは実験データを解析する際には、考慮しておかねばならない。一方流体への熱伝達の計算は、流体との接触面での熱伝達率を境界条件として与え固体側の熱伝導方程式と流体との熱バランスを解いて温度を求める。この場合熱伝達率は、流体側の条件により実験式を適宜選択する。現在の熱伝達率選択の基準は、複雑な流動に必ずしも対応していない為に、固体壁面あるいは、燃料表面温度が実際とは異なることがある。

以上のように、RELAP 4は、完成された計算コードというわけではない。従って、本解析では、RELAP 4による解析結果と実験結果を比較検討することにより、RELAP 4の計算モデル、計算手法上の問題点を指摘しながら、冷却材喪失事故解析コードに共通な問題点を摘出し今後の改良、開発に寄与することを目的としている。

#### 3.2 ボリュームの決め方

LOFT実験をRELAP 4で解析するために、LOFT炉を、いくつかの流体ボリュームに分割した。分割の基準を、これまでのRELAP 4の使用経験及びLOFT炉の計測点の位置に基づき、次のように定めた。

- (1) 水平配管は、均質モデルの計算が妥当と思われる長さに区切る。
- (2) 高さの大きい流体ボリュームは、単一圧力容器で近似できるように、できるだけ単純な形態になるように選ぶ。

(3) 流体ボリュームの中に、大巾な流路形状変化がないように選び、流路形状変化箇所はジャンクションになるように選ぶ。

(4) 計測点が、各ボリュームの中心に近くなるように選ぶ。

(5) 加圧器サージライン等の配管接続箇所は、ボリュームの中心に近くなるようにする。

以上の基準に従って、LOFT炉をノードとジャンクションに分割した結果をFig. 3.1からFig. 3.3に示す。第1図に示すCase Aでは、圧力抑制容器、再冠水補助系を考慮していない。Case Bは、Case Aに、破断ノズル(ボリューム25)を独立させ、圧力抑制容器(ボリューム26)、再冠水補助系(ボリューム27, 28)を付加したものである。第2図、第3図では、ノードとジャンクションを、前出の基準に従って、新たに作成したものである。第2図に示すCase Cでは、破断ノズルを独立なボリュームとしていないが、圧力抑制容器、再冠水補助系には、それぞれボリュームを与えた。第3図のCase Dでは、Core bypassを省略し、破断ノズルにボリュームを与えた。Case Eは、Case Dの加圧器サージラインをさらに2つに分割したものである。これらのうち、Case Eが今後のLOFT実験解析の基準となるノーディングである。Table 3.1に、Case Eを基準とした、各ボリュームの体積等の数値を示し、Table 3.2にそれぞれのボリュームに対応する計測点を示す。これらの数値は、日米LOFT協定に基づいて入手した資料<sup>[12]</sup>から作成したもので、各ボリュームの詳細をFig. 3.4~Fig. 3.22に示す。尚入手資料記載の数値には、一部矛盾があるので、本解析では、最も妥当と思われる数値を定め、それに基づいて計算した。さらに、資料記載の図及び表からは明きらかでない蒸気発生器内の寸法については、米国の解析に使用している数値<sup>[13]</sup>を使用した。

### 3.3 ジャンクションと流路形状抵抗係数の決め方

RELAP 4による解析では、各流体ボリュームを接続する流路ジャンクションでの流動抵抗を正確に与えることが、冷却材挙動を正しく計算するために必要である。ジャンクションでの流動抵抗は、流路形状変化によるもので、RELAP 4の内部計算では、流路の急縮少または急拡大の場合の抵抗係数算出式を用いて、ジャンクションでの抵抗係数を計算し、入力 of 圧力差に不足または超過する分を残差として、残差抵抗係数で加減する。複雑な流路変化のある場合には入力として与えることもできる。

Table 3.3に、ボリュームの場合と同様にLOFT実験解析の基準ケースとなるCase Eについての、各ジャンクションのデータを示す。これらの数値は、ボリュームの数値と矛盾のないようにFig. 3.4~Fig. 3.22に示した装置概念図から求めたものである。流路形状抵抗係数\* ( $K_F, K_R$ )については、加圧器サージライン、再冠水補助系、蒸気発生器模擬体、ポンプ模擬体を除き、RELAP 4の内部計算で求めた。内部計算で求められない抵抗係数は、以下のように求めた。

\* 形状損失係数、流路圧力損失係数などと呼ばれることもあるが、いずれも Form-loss coefficient のことである。

## (1) 加圧器サージライン

ジャンクション27(サージライン入口)は, RELAP4の内部計算で定めた。ジャンクション30(サージライン中央)では,  $90^\circ$ エルボ1個あたりの抵抗係数を0.1<sup>[14]</sup>とし, 9個のエルボの抵抗を含ませた。ジャンクション28(サージライン出口)では,  $90^\circ$ 分岐管として, 抵抗係数0.5<sup>[14]</sup>を用いた。

## (2) 再冠水補助系

ジャンクション17と25では,  $90^\circ$ 分岐管として, 抵抗係数を0.5<sup>[14]</sup>とした。

## (3) 蒸気発生器模擬体

入口側及び出口側のジャンクション19と21では, それぞれ流路の急拡大, 急縮少による抵抗に, 垂直部分にある7枚の多孔板オリフィスの抵抗のうちの1/2を加えた。1枚の多孔板オリフィスの抵抗は, 平均流路断面積を用いて, 急縮少, 急拡大の組み合わせで求めた。ジャンクション20では, 入口側, 出口側の7枚の多孔板オリフィスの抵抗のそれぞれ1/2ずつの和, つまり, 7枚のオリフィス抵抗を含むように, 抵抗係数を定めた。

## (4) ポンプ模擬体

多孔板オリフィスを用いた, ポンプ模擬体の模擬試験<sup>[15]</sup>の結果を外挿して求めた。

Table 3.1 Volume Data for LOFT Analysis

Volume No. (1)				Description	(2) Components	(3) Volume	(4) Flow Area (ft <sup>2</sup> )	Height (ft)	(5) Elevation (ft)	Notes on volume data
E	D	C	A							
1		1		Intact loop hot leg near RV	Outlet plenum, RV stub, ①	5.03 (4.92)	0.6827	0.932	-0.466	Stub volume corrected
2		2		Intact loop hot leg near PR surge line	②, ③	2.42	0.6827	0.932	-0.466	
3		2		Steam generator inlet	④, ⑤, ⑥, ⑦, ⑧, ⑨	5.88 (5.85)	0.6782 (0.6827)	1.261	-0.466	venturi flow area reduction considered
4		3		Steam generator near RV (6)		24.9	1.6262	11.25	0.312	
5		4		Steam generator near pump (6)		24.9	1.6262	11.25	0.312	
6		5		Steam generator outlet to pump inlet	⑩, ⑪, ⑫, ⑬, ⑭, ⑮	7.42 (6.17)	0.6928 (0.6827)	5.53	-4.633	14'x14'x14' Tee ⑯ included
7		6		Circulation pump No.1	⑰, ⑱, ⑲, ⑳, pump No.1, ㉑, ㉒ branch	6.38	0.9811	4.987	-4.633	Tee ⑳ excluded ㉑ branch included
8		7		Circulation pump No.2	⑳, ㉑, ㉒, ㉓, pump No.2, ㉔, ㉕, ㉖	7.41 (8.035)	0.8121 (0.6827)	4.987	-4.633	Tee ㉖ excluded

( ) denotes actually used data



Table 3.1 continued

( ) denotes actually used data

Volume No. (1)		Description	Components (2)	Volume (3)	Flow Area (ft <sup>2</sup> ) (4)	Height (ft)	Elevation (ft) (5)	Notes on volume data
E	D							
9		Intact loop cold leg near pump	(28), (29), (30)	4.02	0.656 (0.6827)	0.932	-0.466	Flow area reduction by reducer considered
10		Intact loop cold leg near RV	(31), (32), RV stub	5.29	0.6827	0.932	-0.466	
11		Downcomer		33.3	1.963	16.963	-13.96	
12		Lower plenum		22.71	8.402	2.703	-16.365	
13		Core simulator below orifice plate		32.3	2.788	11.587	-13.662	
14		Core simulator above orifice plate	Core simulator above orifice plate	10.9	2.483	5.028	-2.075	
15	16	Blowdown loop hot leg	RV outlet plenum RV stub, (1), (2), (3)	5.794	0.6827	0.932	-0.466	
16	17	SG simulator inlet	(4), (5), (6), (7), (8)	0.448	0.09	2.523	-0.169	
17	18	Steam generator simulator near RV	(9), (10), (11) half of (12)	10.871 (11.89)	1.0265 (1.137)	9.476	2.354	excludes orifices & Bolts volume
18	19	Steam generator simulator near pump simulator	half of (13), (14), (15)	10.871 (11.89)	1.0265 (1.137)	9.476	2.354	excludes orifices & Bolts volume

Table 3.1 continued

( ) denotes actually used data

E	Volume No. (1)			Description	Components (2)	Volume (3)	Flow Area (4) (ft <sup>2</sup> )	Height (ft)	Elevation (5) (ft)	Notes on volume data
	D	C	B							
19	20	20	21	SG simulator outlet to pump simulator	29, 28, 27, 28, 25	1.087 (1.764)	0.1368 (0.276)	6.792 (6.80)	-4.438 (-4.445)	excludes orifices and Bolts volume
20	21	21	22	Pump simulator outlet to break	24, 23, 22, 21, 10, 4	0.555	0.09	4.318 (4.148)	-4.148	
21	22	16		Blowdown loop cold leg near RV	RV stub, 12, 13, 14	4.943 (4.893)	0.6827	0.932	-0.466	
22	23	15		Pressurizer		34.0	6.084 (7.68) <sup>(7)</sup>	6.925 (6.777)	3.786 (3.848)	
23	24	23		PR surge line near hot leg	7 thru 10	0.235 (0.224)	0.0156	1.396	0.466	
24	25	25		Reflood assist line near hot leg	2, 5, 24, 23, 5, 50, 52, 56	5.551 (5.853)	0.418	2.823	-0.365	Center line length corrected
25	26			Reflood assist line near cold leg	10, 40, 41, 42, 43, 45, 46, 44, 48B	6.638 *(6.792)	0.418	1.992	0.466	Center line length corrected
26	27			Header and suppressor tank		3700.9	230.0	16.094	-13.55	

Table 3.1 continued

\* ( ) denotes actually used data

Volume No. (1)					Description	Components (2)	Volume (3)	Flow Area (ft <sup>2</sup> ) (4)	Height (ft)	Elevation (5) (ft)	Notes on volume data
E	D	C	B	A							
	27	22	28	16	Blowdown loop cold leg break nozzle	⑮	0.144	0.09	0.3386	-0.169	
28	23	24	23		Pressurizer surge line near PR	nozzle, PR stub, ① thru ⑥	0.244 (0.224)	0.0297 (0.0156)	2.584	1.722	
—	—	—	15		Ccre bypass						
Total volume excluding suppression header and tank							274.2 (277.0)				

Table 3.1 continued

NOTES

- (1) Volume No. corresponds to the following case. Refer to Figures 1 through 3.
- |   |    |         |    |           |   |   |
|---|----|---------|----|-----------|---|---|
| A | 24 | volumes | 28 | junctions | : | No volume corresponding to reflood assist line, break nozzle and suppression tank |
| B | 28 | "       | 31 | "         | : | A + (volumes for reflood assist line, break nozzle, suppression tank)             |
| C | 27 | "       | 31 | "         | : | Revised nodding, no volume for break nozzle                                       |
| D | 27 | "       | 29 | "         | : | C + (volume for break nozzle) - (core bypass volume)                              |
| E | 28 | "       | 30 | "         | : | D + (divided PR surge line volume), Reference case.                               |
- (2) Refer to Figures 4 through 22. Circled number corresponds to piping number in the figures.
- (3) Volume is the sum of each component volume.
- (4) Flow area is obtained by dividing volume by center line length of the volume.
- (5) Center of RV stub is set to zero elevation.
- (6) Inside of the steam generator is not known. Dimensions are obtained from EP-L1-2. (4)
- (7) Flow area is based on vessel I.D. 33.4 in.

Table 3.2 Corresponding Instrumentations to Volume for LOFT Analysis

Volume No.	Type of Measurement (1)											NOTES	
	PE	PT	TE	FE	ME	DE	PdE	PdT	LE	LT			
1	PC-2		PC-2 P139-32 -33 -34	PC-2	PC-2	PC-2	PC-3 RV-4	P139-30					
2		P139-2 -3 -4											
3			SG-1				PC-2,3,4						TE-SG-3 secondary side
4			SG-2										
5			PC-3	PC-3	PC-3	PC-3	PC-1,2						
6	PC-3A -3B												
7							PC-9						Pump 4 P
8							PC-10						Pump 4 P
9							PC-1,5						
10	PC-1		PC-1 P139-29 -28-2	PC-1	PC-1	PC-1	PC-5 -7	P139-30					

Table 3.2 continued

Volume No.	Type of Measurement										NOTE	
	PE	PT	TE	FE	ME	DE	PdE	PdT	LE	LT		
11	1ST-3FF -3A -3B 2ST-3FF		1ST-1 { 6 14 2ST-1 { 6 14	1ST-1 2ST-1	1ST-1 2ST-1		2ST-2 RV-3 CS-1 RV-1		1ST-2-1 { 12 2ST-2-1 { 12			
12	1ST-1FF -1A -1B 2ST-1FF -1A -1B		1ST-7 { 13 2ST-7 { 13				2ST-2		1ST-1-1 { 7 2ST-1-1 { 7			
13												No measurement
14	CS-1FF -2FF -1A -1B		CS-1	CS-1	CS-1		CS-1 RV-4					
15	BL-2		BL-2	BL-2	BL-2	BL-2	BL-2					
16	BL-3						BL-2 -8					
17							BL-7 -8					

Table 3.2 continued

Volume No.	Type of Measurement (1)										NOTES			
	PE	PT	TE	FE	ME	DE	PdE	PdT	LE	LT				
18														
19	BL-6													
20	BL-3													
21	BL-1		BL-1	BL-1	BL-1	BL-1								
22		PI39-5 -6 -7 -8	PI39-19 -20										PI39-6 -7 -8	
23														None
24			(BL-3)											
25			(BL-3)											
26			SV1-1~6 SV2-1 5											Suppression system not listed here
27	BL-4													
28														None

Table 3.2 continued

## NOTES

PE	:	Pressure
PT	:	Pressure (Process instrumentation)
TE	:	Temperature
FE	:	Flow rate
ME	:	Momentum flux
DE	:	Density
PdE	:	Differential pressure
PdT	:	Differential pressure (Process instrumentation)
LE	:	Liquid level
LT	:	Liquid level (Process instrumentation)



Table 3.3 Junction Data Used for Analysis

( ) indicates actually used data

Junction No.	Location	Connecting volumes		Flow area (ft <sup>2</sup> )	Elevation (ft)	Configuration	Form loss coefficient		
		From	To				K <sub>F</sub>	K <sub>R</sub>	K <sub>Residual</sub>
1	Intact loop hot leg near RV	1	2	0.6827	0.0	Circular vertical	0.0	0.0	0.37
2	Intact loop hot leg near SG	2	3	0.6827	0.0	Circular vertical	0.0	0.0	0.33
3	Steam generator inlet	3	4	0.3465 <sup>(1)</sup>	0.812 <sup>(2)</sup> (0.795)	Circular 37° inclined	0.0	0.0	1.17
4	Steam generator top	4	5	1.63	10.03	Circular vertical	0.0	0.0	57.8
5	Steam generator outlet	5	6	0.3465 <sup>(1)</sup>	0.812 <sup>(2)</sup> (0.897)	Circular 53° inclined	0.0	0.0	1.0
6	Pump 1 inlet	6	7	0.6827	-4.167	Circular vertical	0.0	0.0	6.21
7	Pump 2 inlet	6	8	0.6827	-4.167	Circular vertical	0.0	0.0	6.21
8	Pump 1 outlet	7	9	0.3941	0.0	Circular vertical	0.0	0.0	1.52

Table 3.3 continued

Junction No.	Location	Connecting volumes		Flow area (ft <sup>2</sup> )	Elevation (ft)	Configuration	Form loss coefficient		
		From	To				K <sub>F</sub>	K <sub>R</sub>	K <sub>Residual</sub>
9	Pump 2 outlet	8	9	0.3941	0.0	Circular vertical	0.0	0.0	1.52
10	Intact loop cold leg	9	10	0.6827	0.0	Circular vertical	0.0	0.0	0.24
11	Intact loop cold leg to downcomer	10	11	0.6827	0.0	Circular vertical	0.0	0.0	1.38
12	Downcomer to lower plenum	11	12	1.84	-13.96	Circular vertical	0.0	0.0	8.34
13	Lower core support structure	12	13	2.826	-13.662	Circular vertical	0.0	0.0	9.71
14	Core simulator orifice plate	13	14	0.5144	-2.075	Circular vertical	0.0	0.0	0.25
15	Core simulator to intact loop hot leg	14	1	0.6827	0.0	Circular vertical	0.0	0.0	1.64
16	Core simulator to blowdown loop hot leg	14	15	0.6827	0.0	Circular vertical	0.326	0.525	0.0
17	Reflood assist line to blowdown loop hot leg	24	15	0.3941	0.466	Circular vertical	0.5	0.5	0.0

Table 3.3 continued

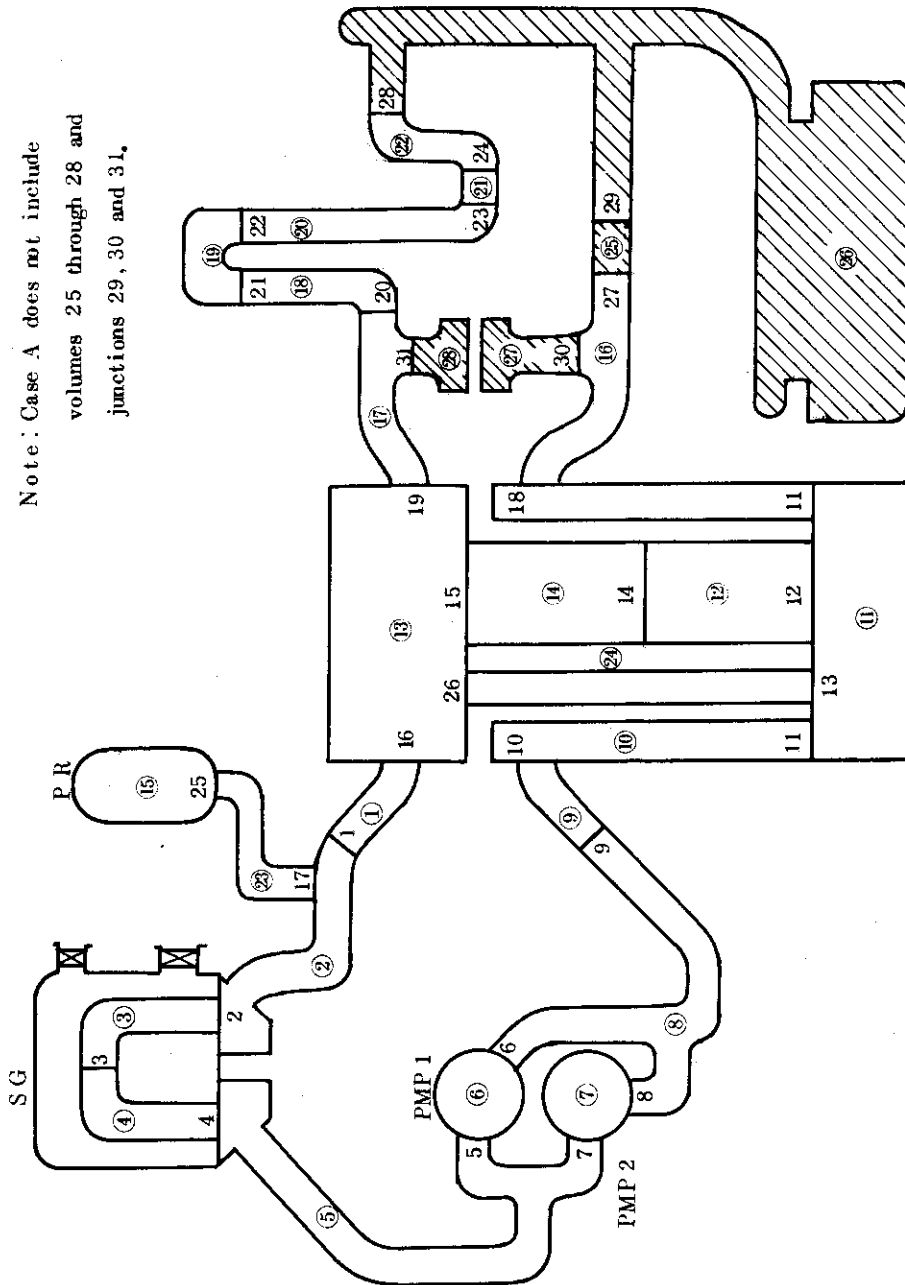
Junction No.	Location	Connecting volumes		Flow area (ft <sup>2</sup> )	Elevation (ft)	Configuration	Form loss coefficient		
		From	To				K <sub>F</sub>	K <sub>R</sub>	K <sub>Residual</sub>
18	Blowdown loop hot leg	15	16	0.09	0.0	Circular vertical	0.39	0.75	0.0
19	Steam generator simulator inlet	16	17	0.09	2.354	Circular horizontal	1.52	1.09	0.0
20	SG simulator top	17	18	0.206	11.228	Circular vertical	7.02	7.02	0.0
21	SG simulator outlet	18	19	0.09	2.354	Circular horizontal	1.09	1.52	0.0
22	Pump simulator orifice plates	19	20	0.09	-3.979	Circular vertical	17.1	17.1	0.0
23	Break plane	20	26	0.09	0.0	Circular vertical	1.0	0.45	0.0
24	Downcomer to blowdown loop cold leg	11	21	0.6827	0.0	Circular vertical	0.29	0.43	0.0
25	Reflood assist line to blowdown loop cold leg	25	21	0.3941	0.0	Circular horizontal	0.5	0.5	0.0
26	Break nozzle inlet	21	27	0.09	0.0	Circular vertical	0.39	0.75	0.0

Table 3.3 continued

Junction No.	Location	Connecting volumes		Flow area (ft <sup>2</sup> )	Elevation (ft)	Configuration	Form loss coefficient		
		From	To				K <sub>F</sub>	K <sub>R</sub>	K <sub>Residual</sub>
27	Pressurizer surge line nozzle holes	22	28	0.0504 (0.0297)	4.115	Circular vertical	3.74	6.05	0.0
28	PR surge line to intact loop hot leg	23	2	0.0156	0.466	Circular horizontal	0.95	0.44	0.0
29	Break plane	27	26	0.09	0.0	Circular vertical	1.0	0.45	0.0
30	PR surge line	28	23	0.0156	1.792	Circular vertical	0.9	0.9	0.0

NOTE: (1) High resistance orifice

(2) Input data borrowed from EP-11-2



Note: Case A does not include volumes 25 through 28 and junctions 29, 30 and 31.

Fig. 3.1 Node and Junction Representation for LOFT Analysis, Case A and Case B

Note: Case C does not include break nozzle volume, but one volume is assigned to core bypass.

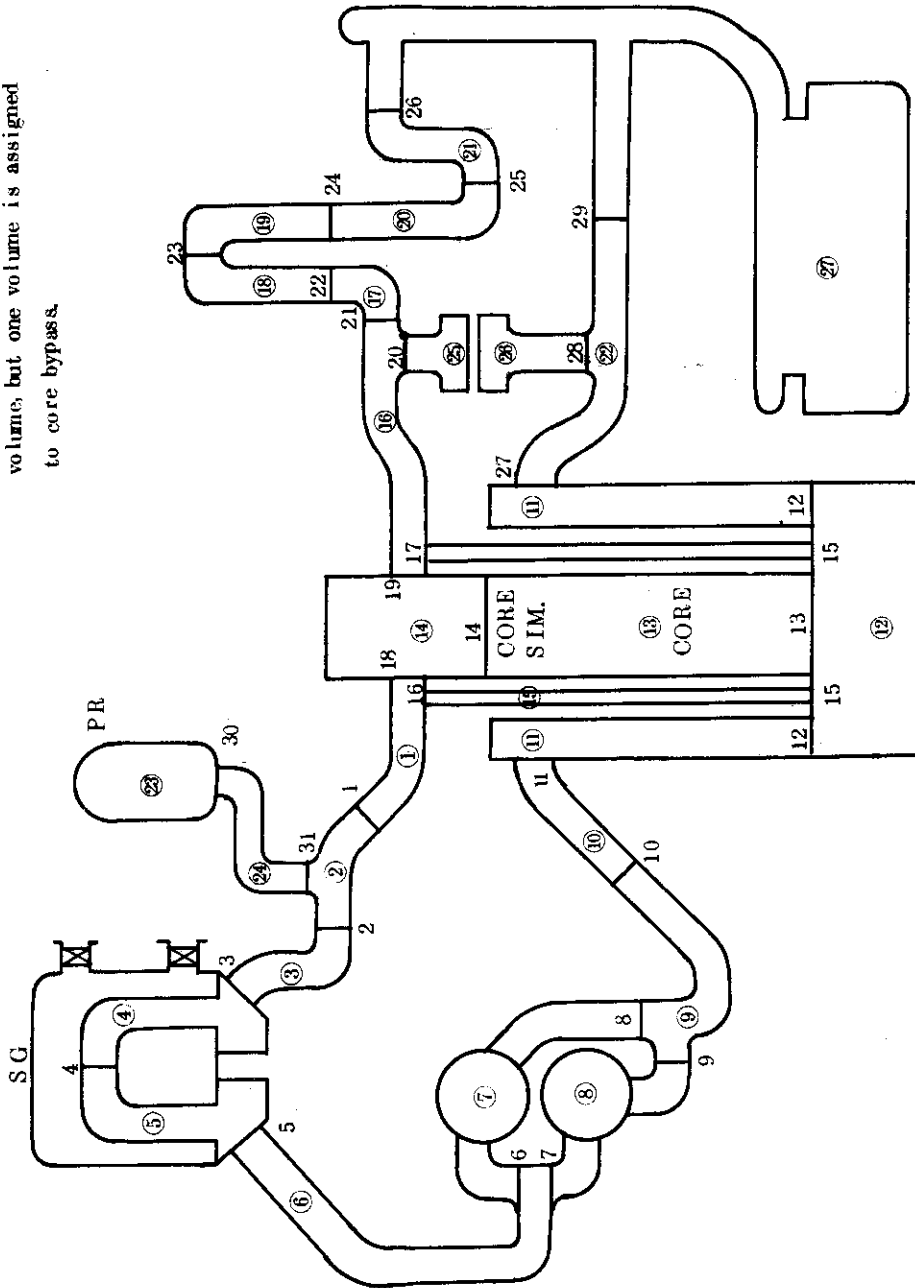
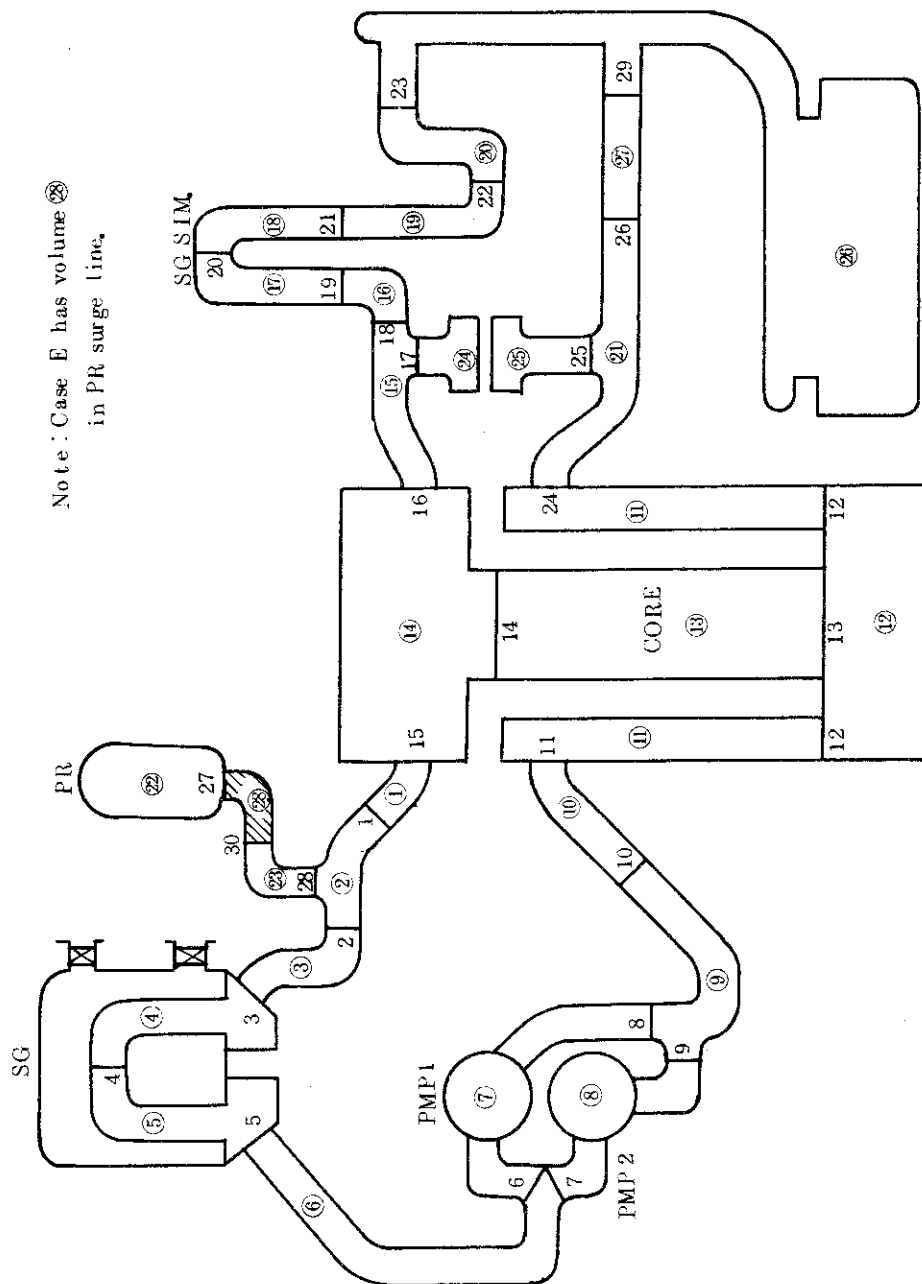


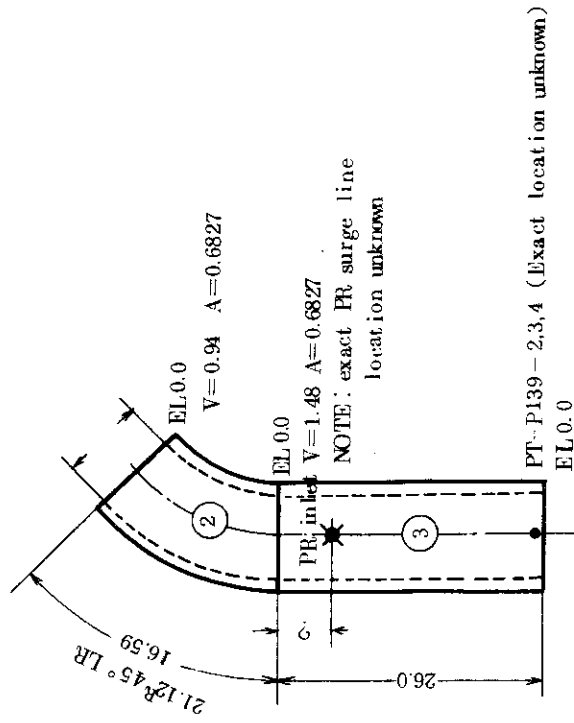
Fig. 3.2 Node and Junction Representation for LOFT Analysis; Case C-Revised Noding



Note: Case E has volume ⑳  
in PR surge line.

Fig. 3.3. Node and Junction Representation for LOFT  
Analysis; Case D and Case E (Reference Case)

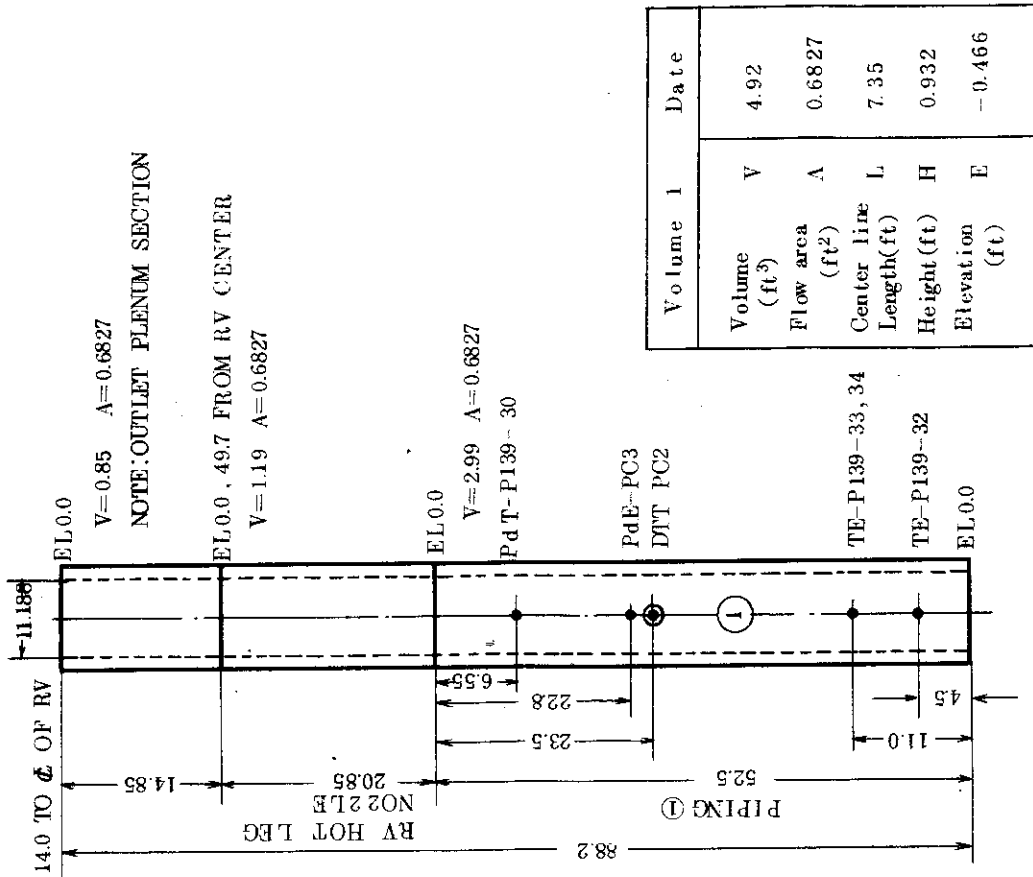
VOLUME 2



Volume 2 Data	
V	2.42
A	0.6827
L	3.549
H	0.932
E	-0.466

Fig. 3.5 Volume 2 details

VOLUME 1

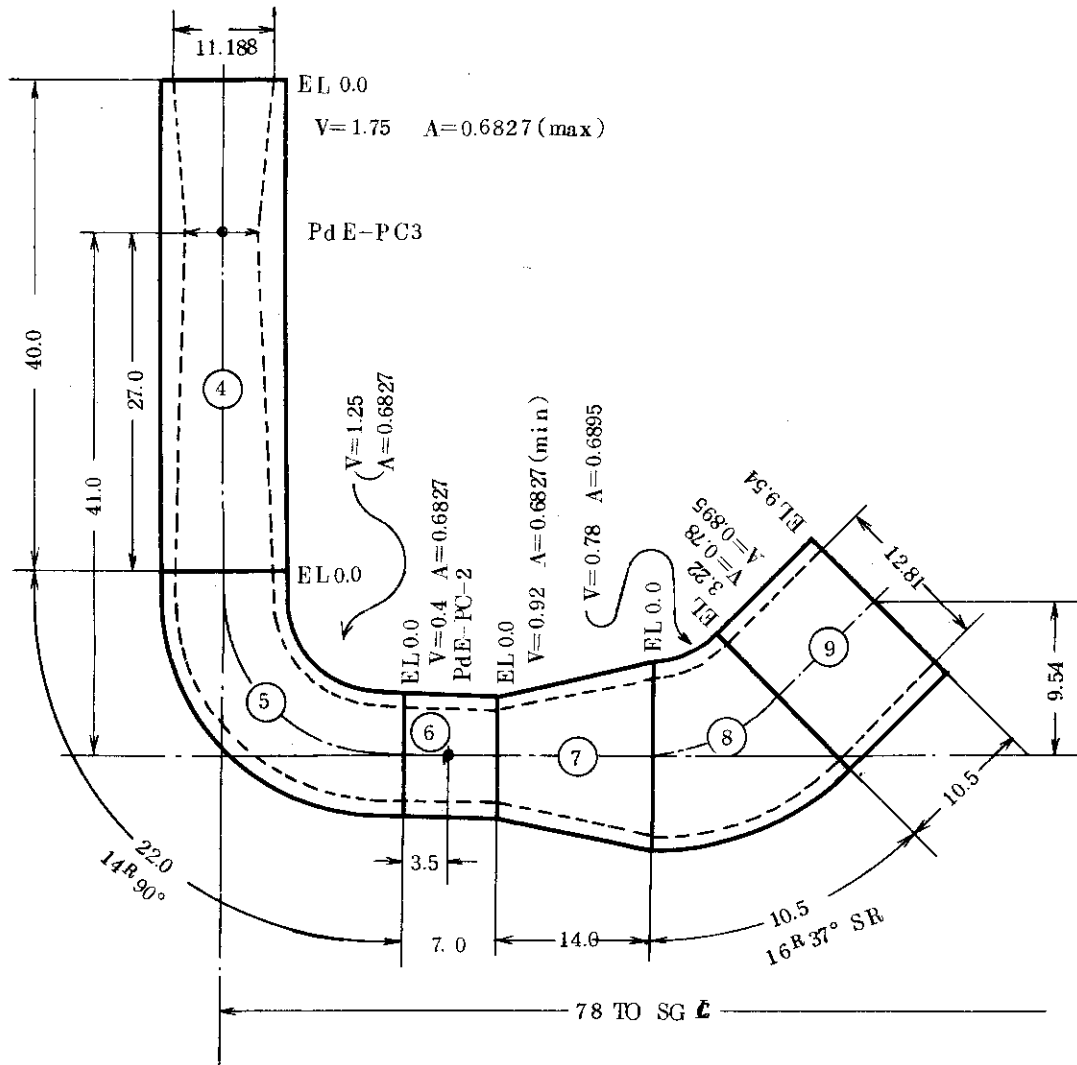


Volume 1		Date
Volume (ft <sup>3</sup> )	V	4.92
Flow area (ft <sup>2</sup> )	A	0.6827
Center line Length(ft)	L	7.35
Height(ft)	H	0.932
Elevation (ft)	E	-0.466

Fig. 3.4 Volume 1 details



Volume 3



Volume 3 Data	
V	5.88
A	0.6782
L	8.67
H	1.261
E	-0.466

Fig. 3.6 Volume 3 details

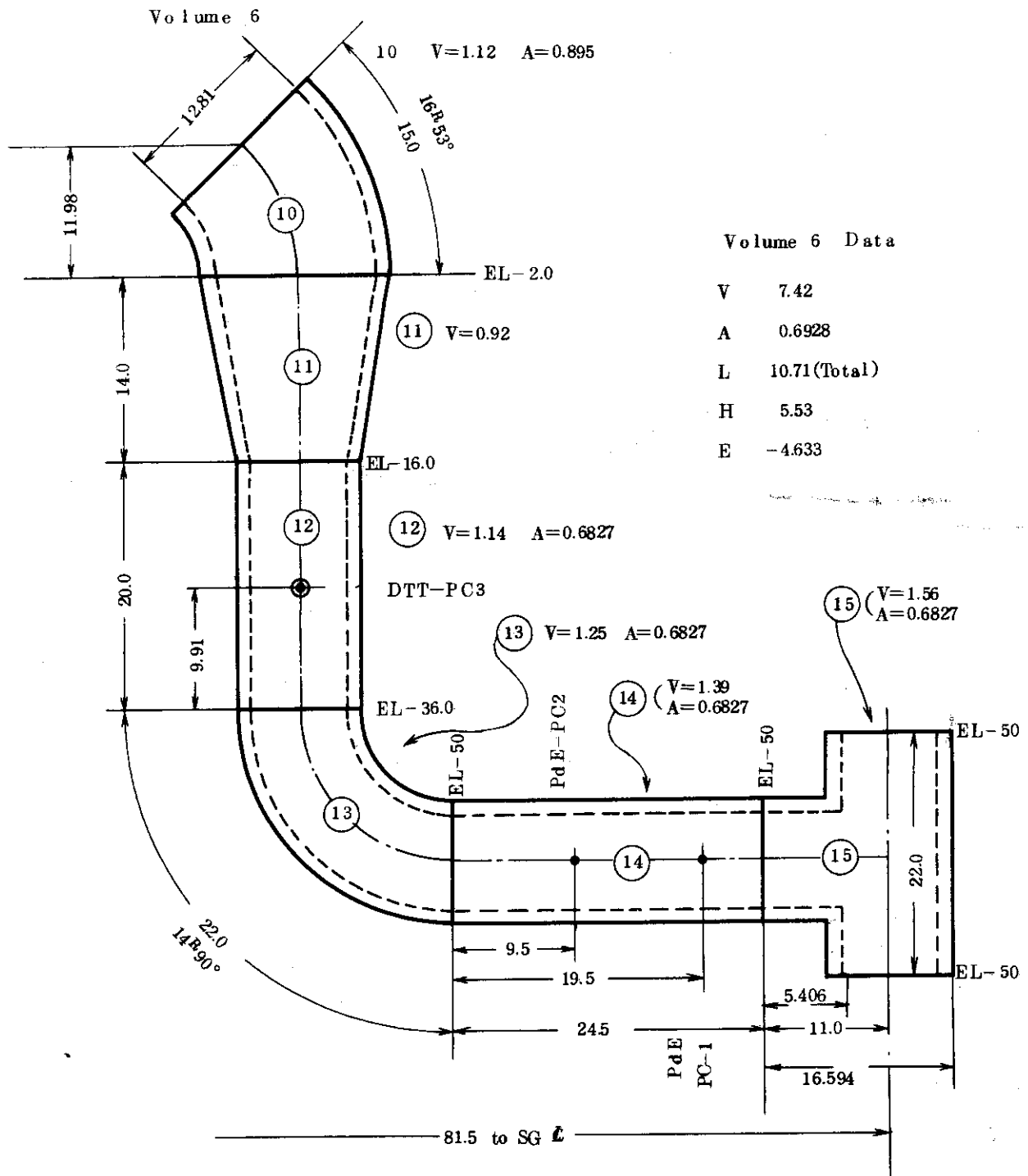


Fig. 3.7 Volume 6 details

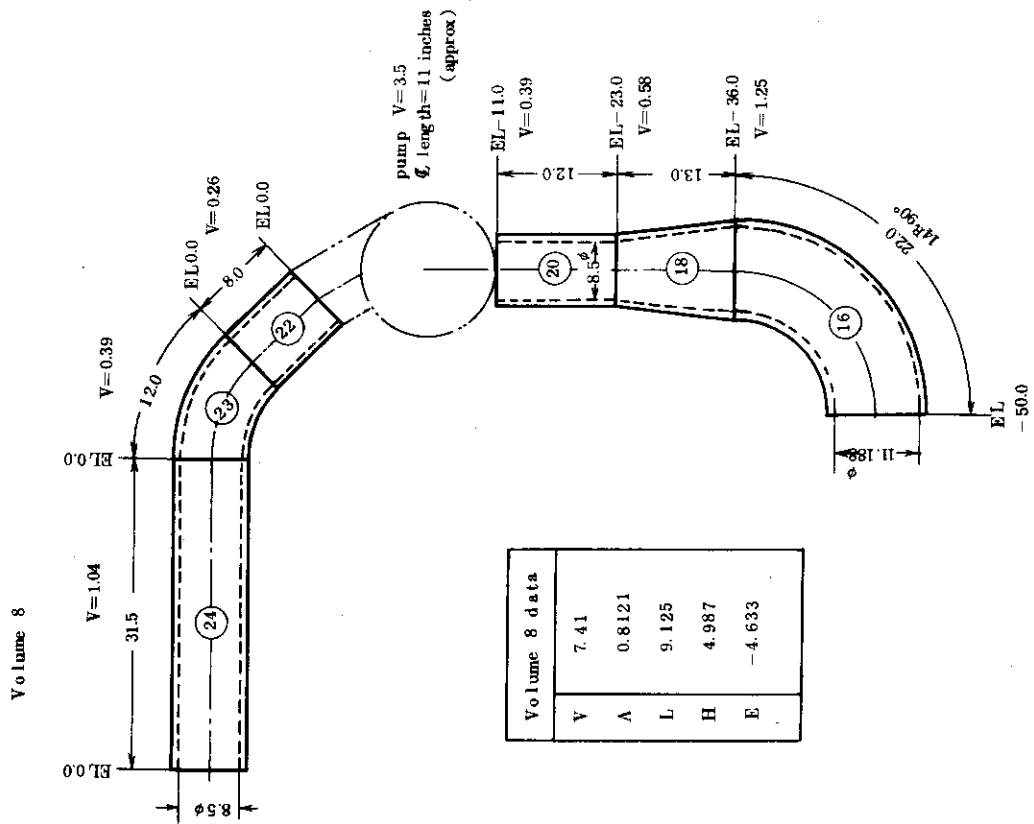


Fig. 3.9 Volume 8 details

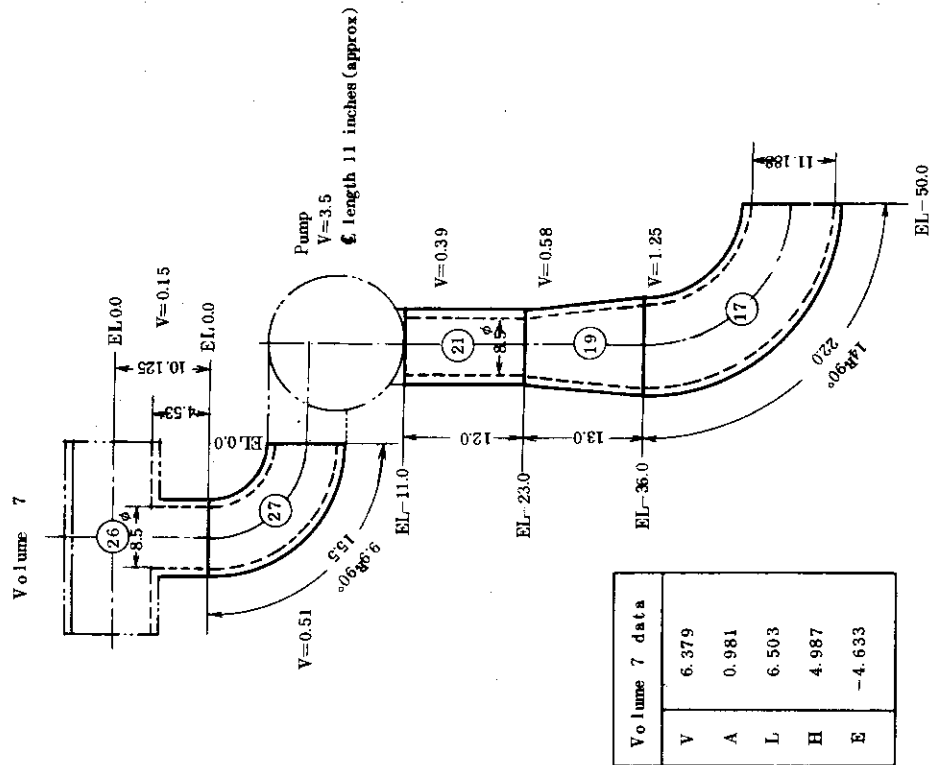


Fig. 3.8 Volume 7 details

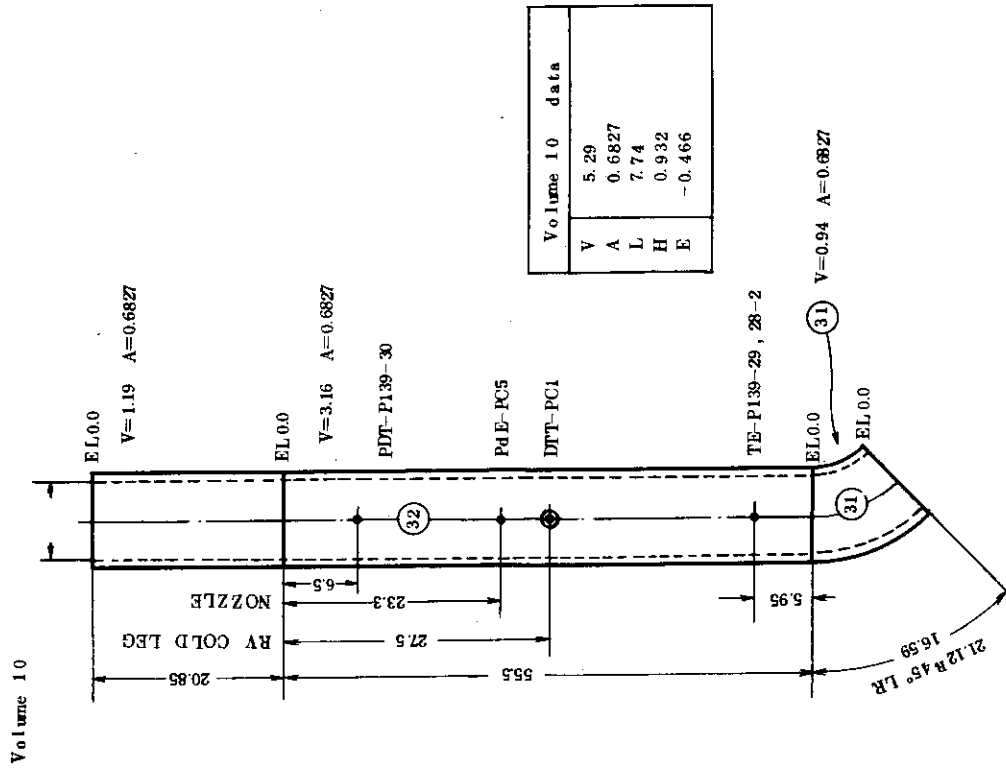


Fig. 3.11 Volume 10 details

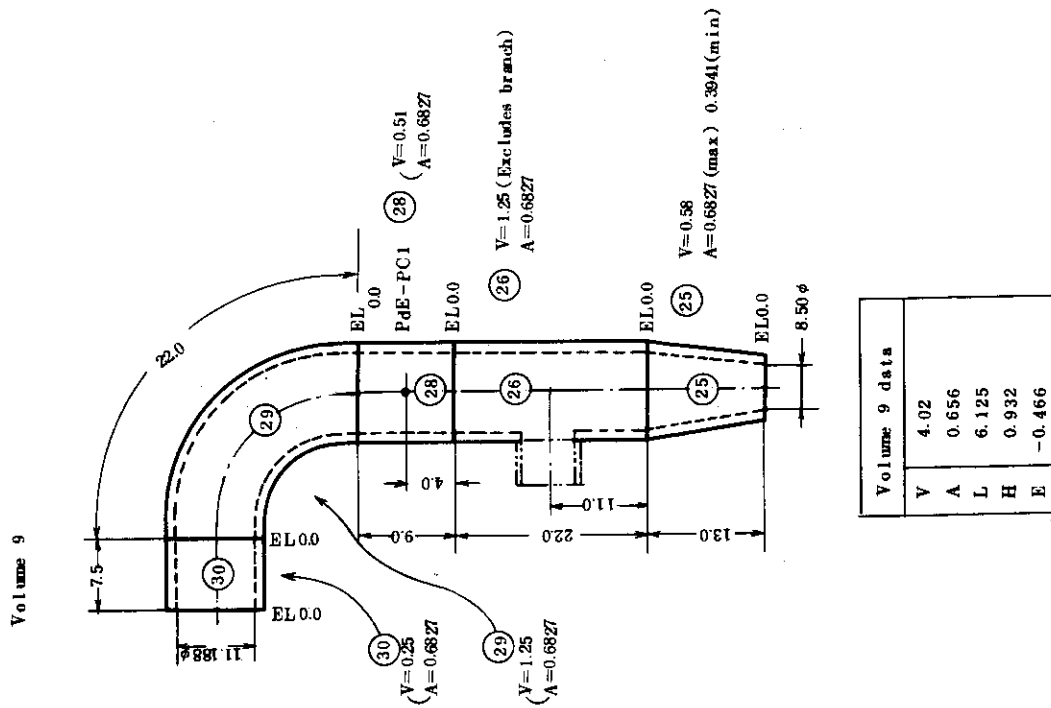
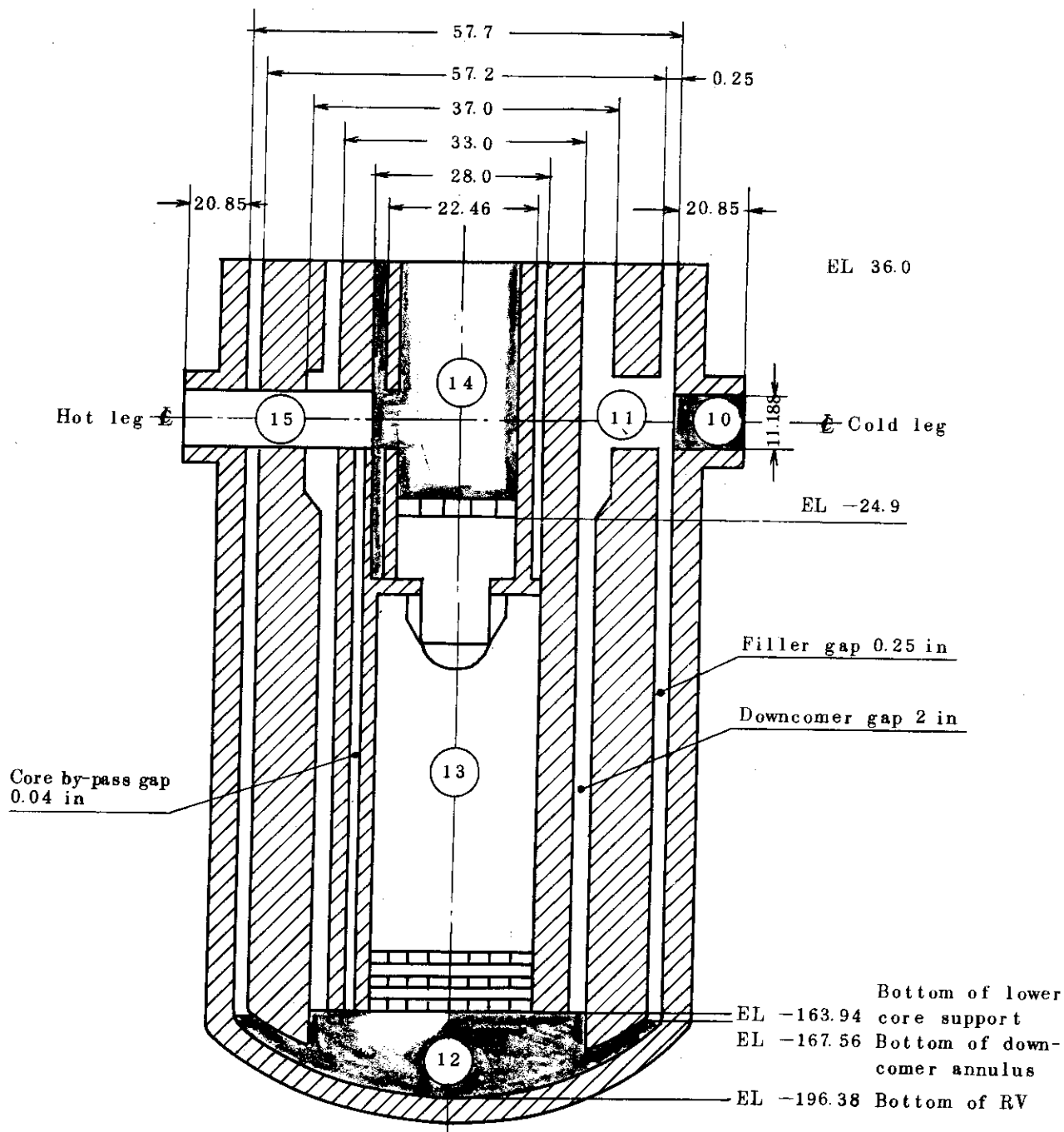


Fig. 3.10 Volume 9 details

Volume 11, 12, 13 & 14



Volume 11		Volume 12		Volume 13		Volume 14	
V	33.3	V	22.71	V	32.3	V	10.9
A	1.963	A	8.402	A	2.788	A	2.483
L	16.963	L	2.703	L	11.587	L	5.028
H	16.963	H	2.703	H	11.587	H	5.028
E	-13.96	E	-16.365	E	-13.662	E	-2.075

Fig. 3.12 Volumes 11, 12, 13 & 14 details

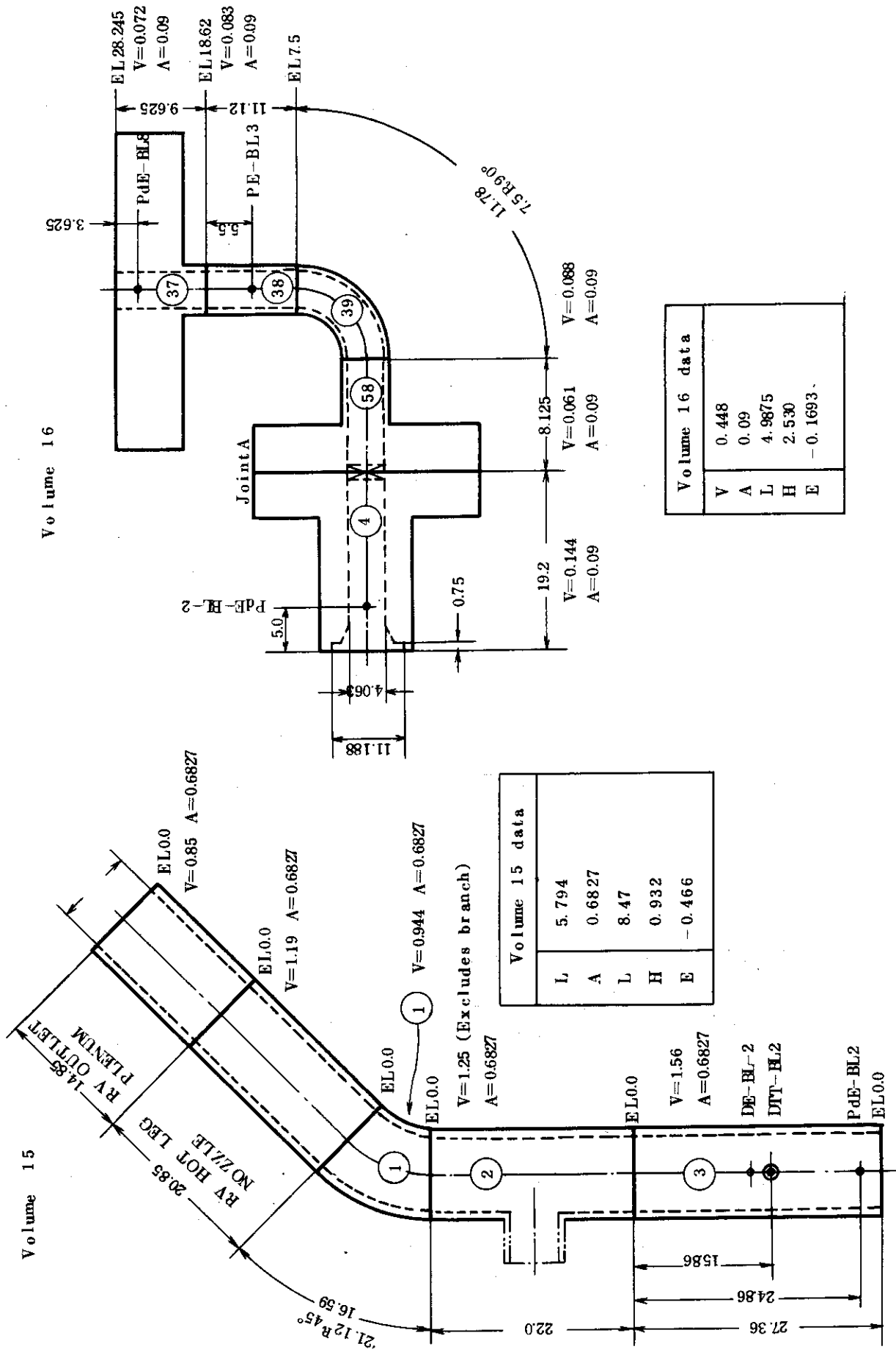


Fig. 3.14 Volume 16 details

Fig. 3.13 Volume 15 details

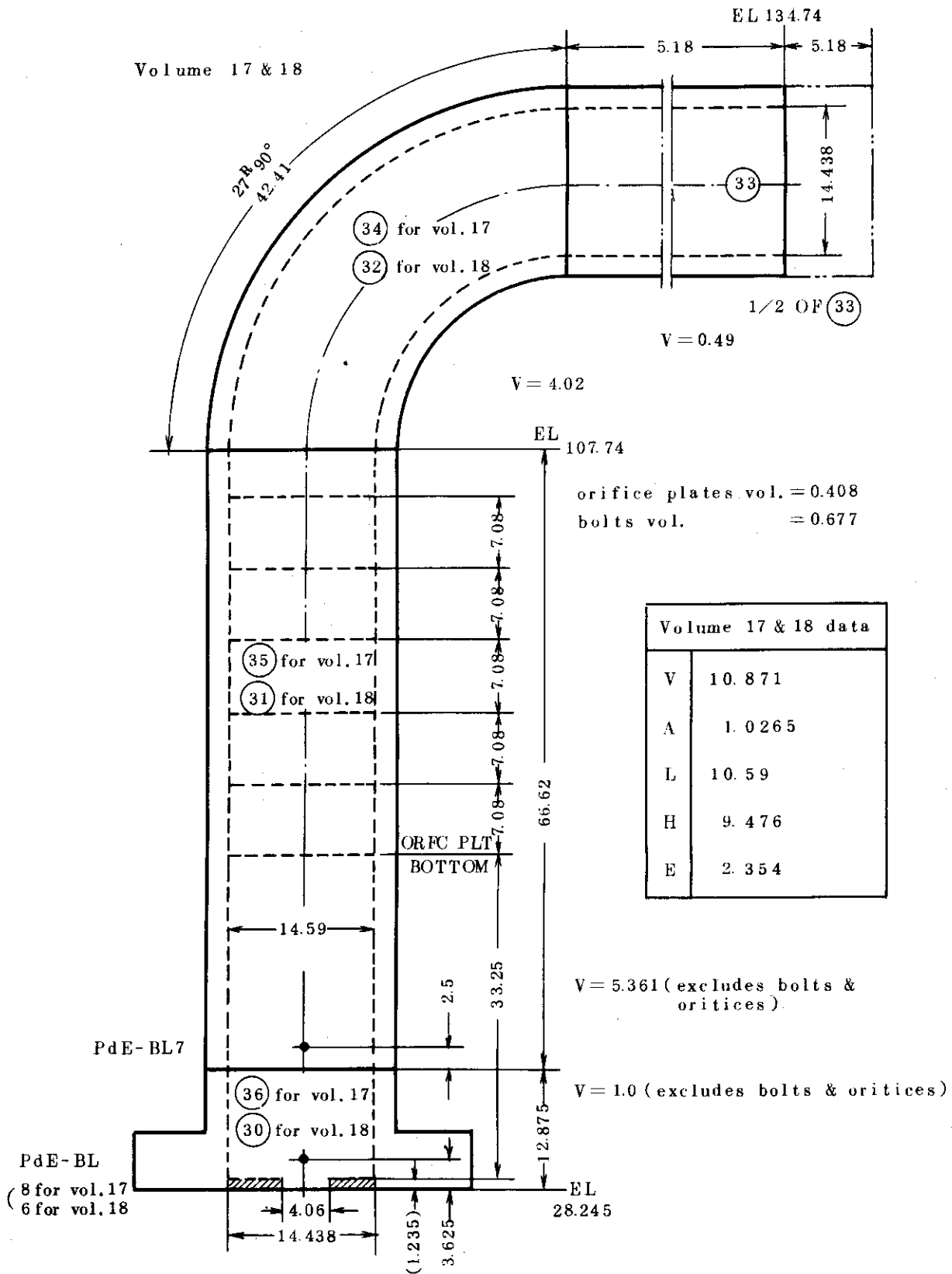


Fig. 3.15 Volume 17 and 18 details

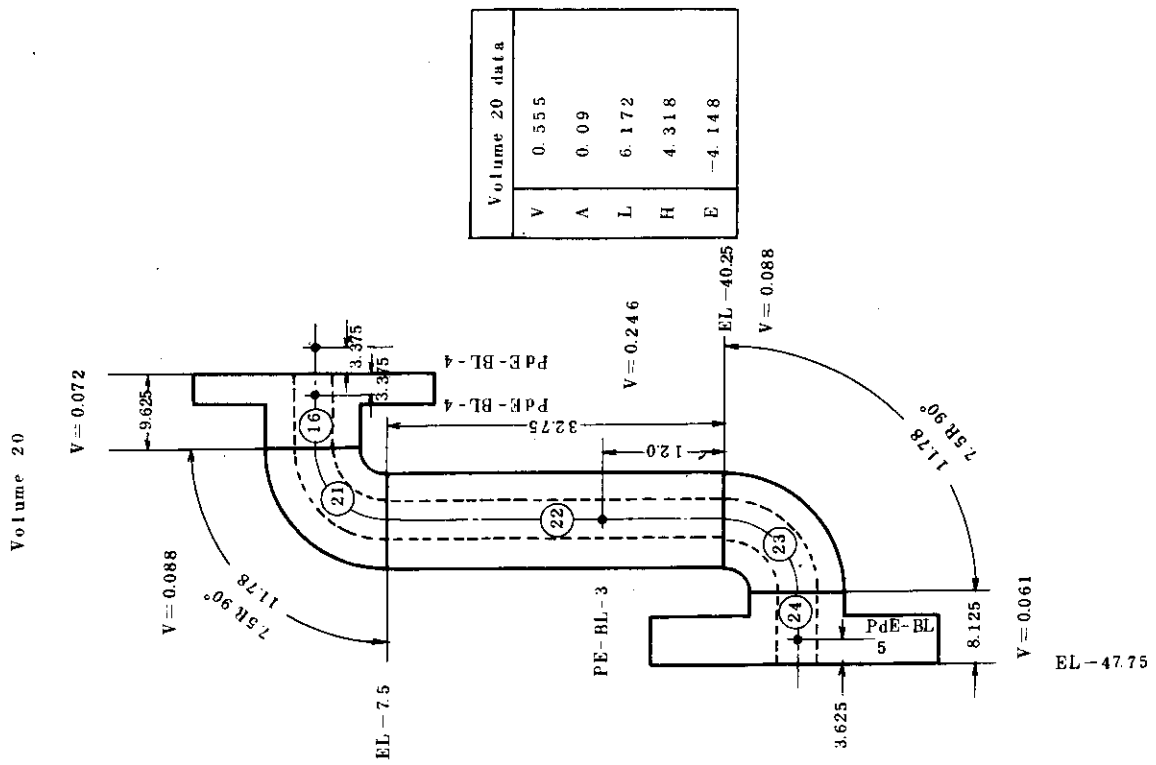


Fig. 3.17 Volume 20 details

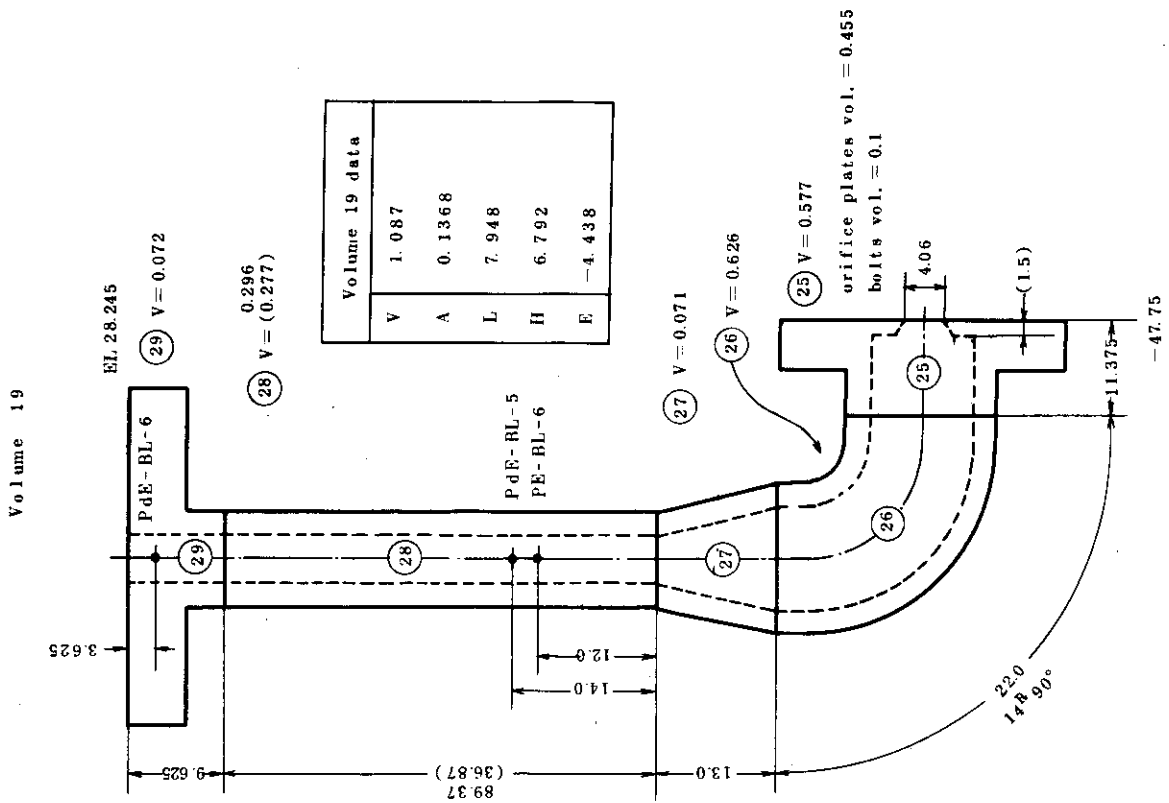


Fig. 3.16 Volume 19 details



Volume 21 & 27

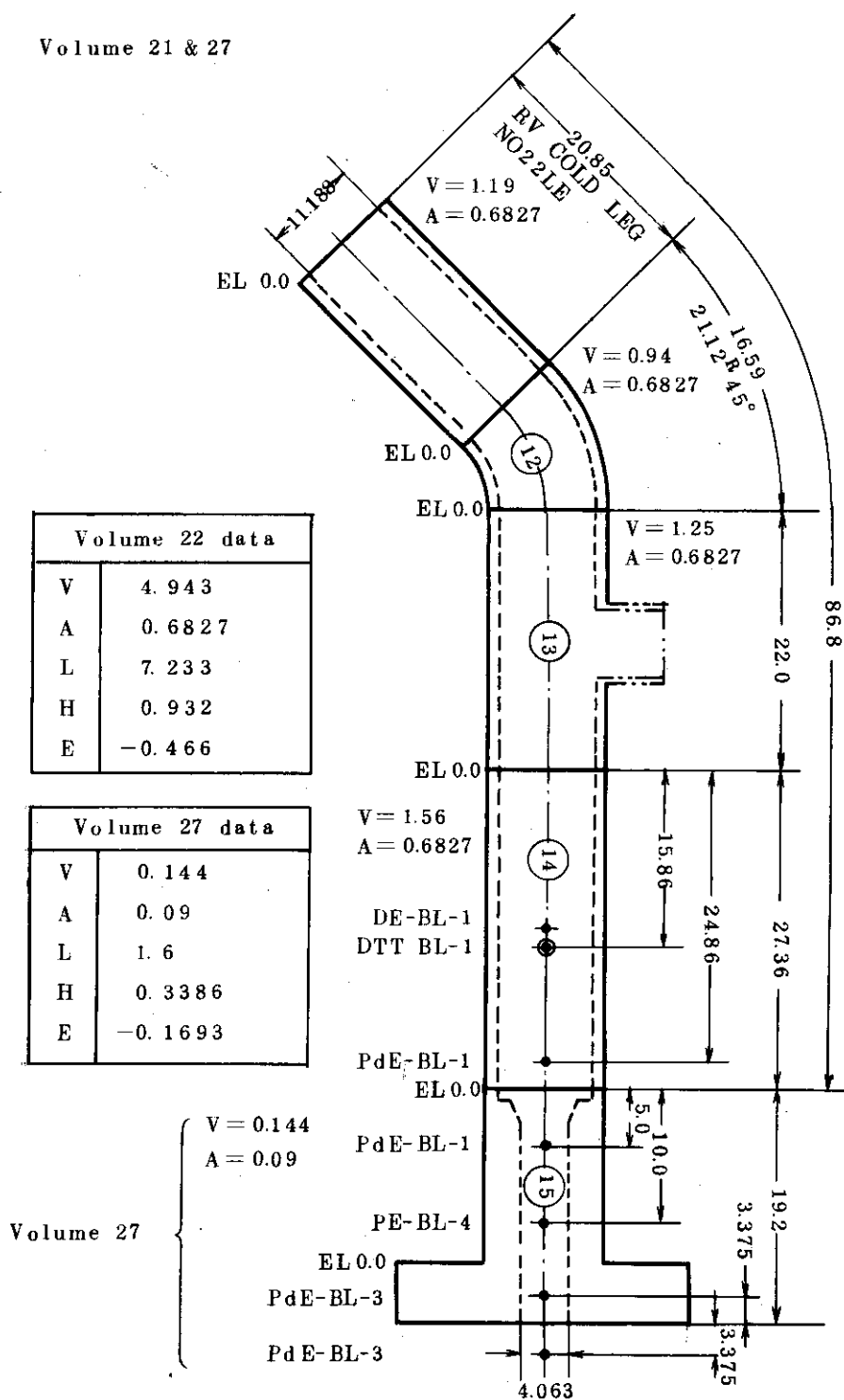
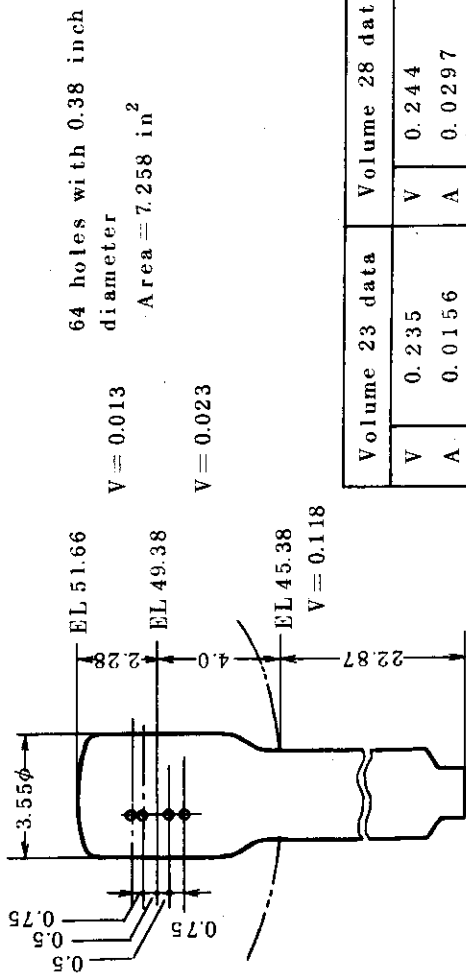


Fig. 3.18 Volume 21 and 27 details

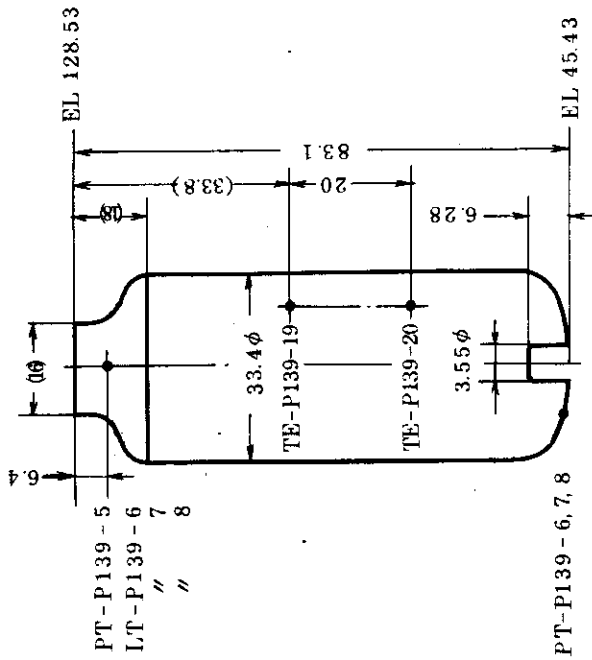
Volume 23 & 28

Surge line nozzle detail



Volume 23 data		Volume 28 data	
V	0.235	V	0.244
A	0.0156	A	0.0297
L	15.33	L	8.205
H	1.396	H	2.584
E	0.466	E	1.722

Volume 22



Volume 22 data	
V	34.0
A	6.084 (Area based on diameter 33.4φ)
L	6.925
H	6.925
E	3.786

Fig. 3.19 Volume 22 details

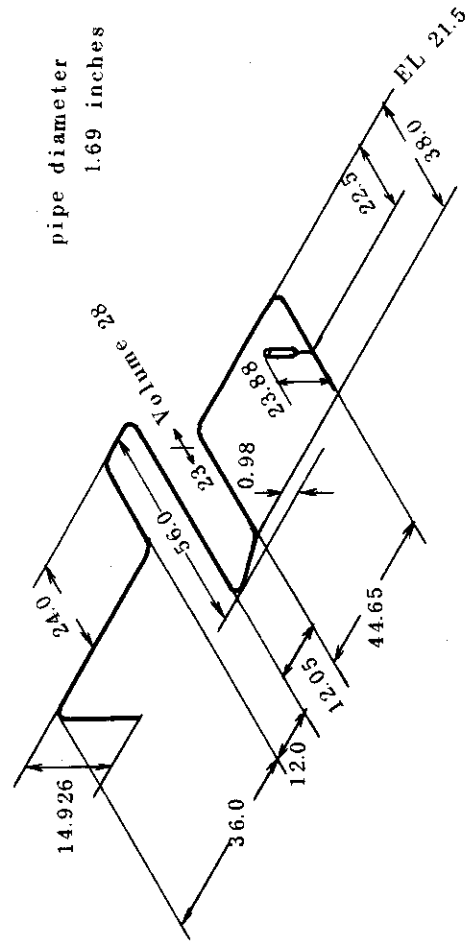


Fig. 3.20 Volume 23 and 28 details

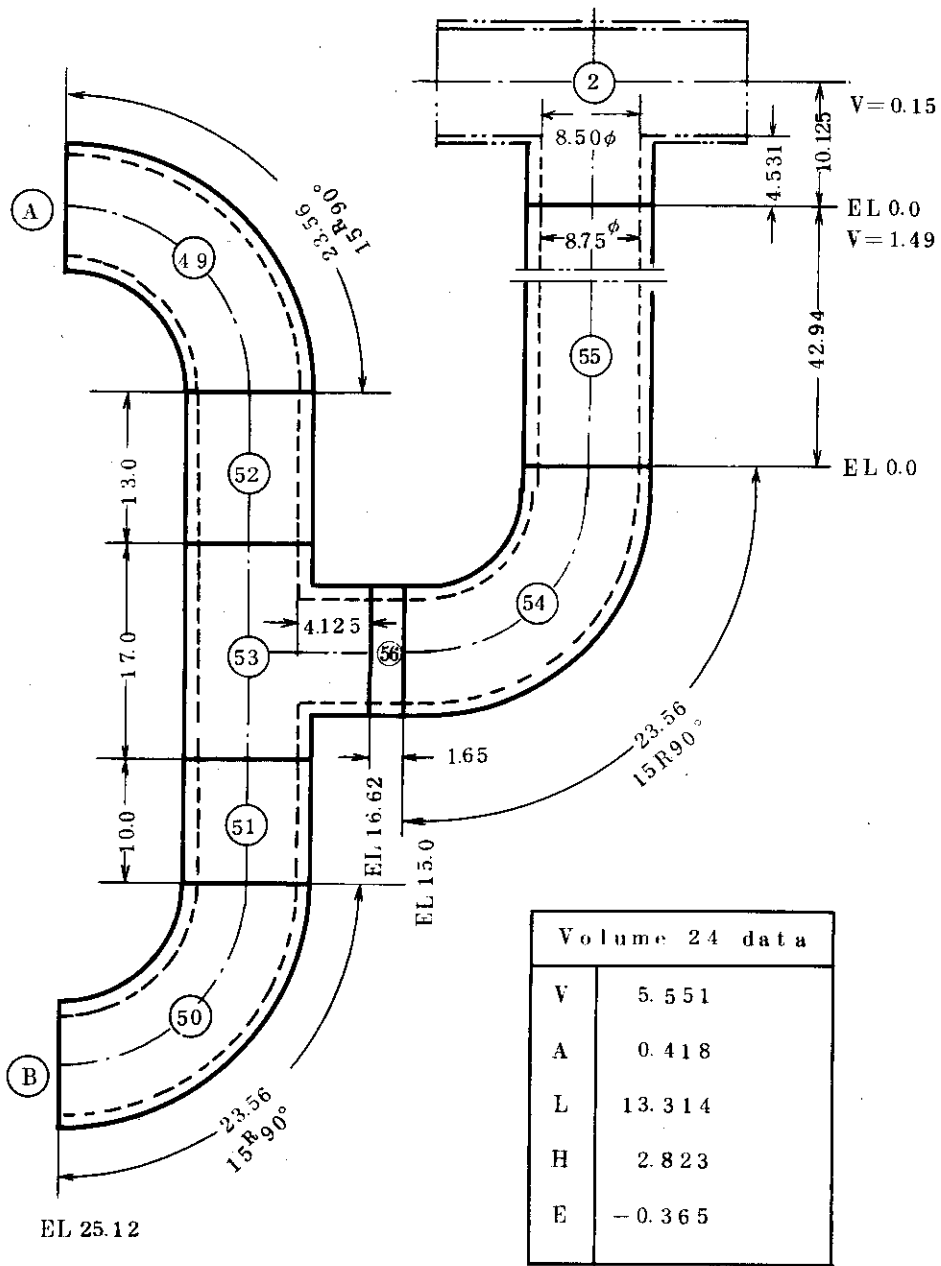


Fig. 3.21 Volume 24 details

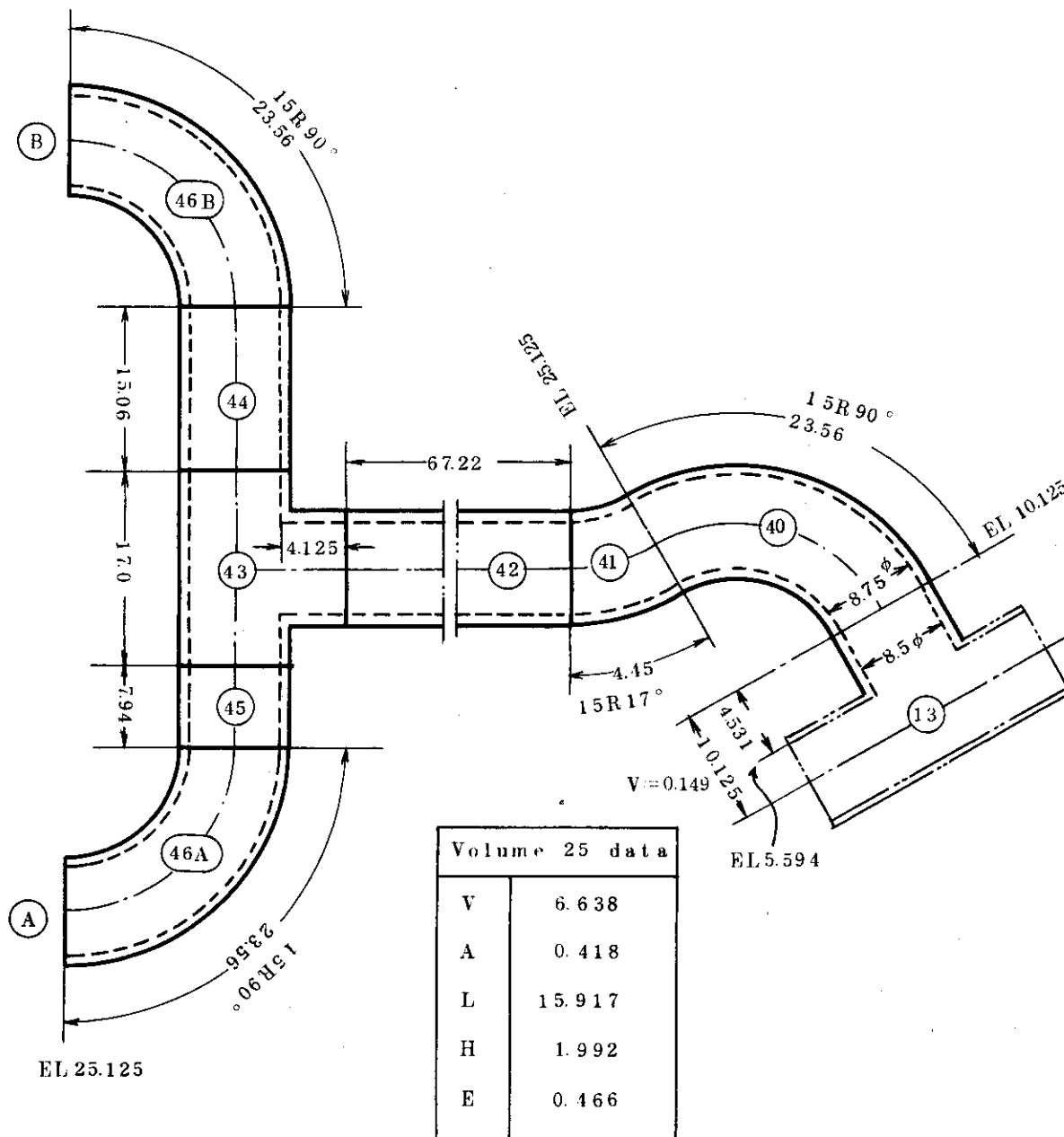


Fig. 3.22 Volume 25 details

## 4. 解析結果とその検討

LOFTのL1-2実験の結果をそのRELAP-4Jコードによる解析結果と比較検討する。まず4.1節では合計23ケースの解析ケースについて説明する。4.2~4.7節においては解析に大きな影響を及ぼすと考えられるパラメータが解析結果にどのような影響を及ぼすかを調べる。4.2節では破断ループの蒸気発生器模擬体およびポンプ模擬体の流動抵抗の効果を調べ、4.3節では健全ループのポンプの特性の影響を調べる。4.4節では上部プレナムおよびダウンカマの水位が解析結果に及ぼす影響を調べる。4.5節ではボリュームの切り方が解析結果に及ぼす影響を調べ、4.6節では熱源構造体(Heat slab)の効果を検討する。4.7節では加圧器およびそのサージラインの取扱い方により解析結果がどう変化するかを調べる。4.8節においては等温ブローダウンにともなう各部の流体条件の時間変化を解析結果をもとに調べる。4.9節においては解析結果と実験結果との比較検討を行う。

### 4.1 解析ケース

LOFTのL1-2実験をRELAP-4Jコードで解析した解析ケースをTable 4.1に示す。解析ケースはおもにケース(1)~(11)とケース(12)~(23)の2つのグループに分けることが出来る。ケース(1)~(11)では炉心バイパスを考慮していたが、その流路断面積が炉心流路と比較して非常に小さいためケース(12)~(23)では無視した。ケース(12)~(23)では健全側ループの加圧器サージラインを出た部分に1ボリュームふやし、破断ループのループ側のボリュームの切り方が蒸気発生器模擬体およびポンプ模擬体との対応づけが容易なように改良した。またケース(12)~(23)ではボリュームおよびジャンクションのデータの全面的見なおしと改訂を行った。

ケース(1)では破断ループの各ジャンクションの形状損失係数(Form-loss coefficient)をボリュームおよびジャンクションの流路面積をもとにコード内で計算させている。蒸気発生器模擬体(Fig. 4.1参照)に対応するジャンクションはJ21, J22であり、ポンプ模擬体(Fig. 4.2参照)に対応するのはジャンクションJ23, J24である。それぞれの流路面積Sおよび形状損失係数は以下のごとくになっている。

$$\left. \begin{array}{l} \text{J 21} \quad S=0.09 \text{ ft}^2, \quad K_f=0.84 \\ \text{J 22} \quad S=0.09 \text{ ft}^2, \quad K_f=0.41 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{S.G. Sim.} \\ \text{(蒸気発生器模擬体)} \end{array}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{J 23} \quad S=0.09 \text{ ft}^2, \quad K_f=0.75 \\ \text{J 24} \quad S=0.09 \text{ ft}^2, \quad K_f=0.39 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Pump Sim.} \\ \text{(ポンプ模擬体)} \end{array}$$

したがって蒸気発生器模擬体とポンプ模擬体の形状損失係数を加えあわせた値 $K_f(\text{Sim.})$ は2.4となる。

ケース(2)ではINEL( Idaho National Engineering Laboratory)におけるLOFT(L1-3)の予備解析<sup>(13)</sup>を参照して蒸気発生器模擬体およびポンプ模擬体の流路面積および形状損失係数を与えた。その結果は以下のとおりである。

$$\left. \begin{array}{l} \text{J 21} \quad S=0.206 \text{ ft}^2, \quad K_f=5.8 \\ \text{J 22} \quad S=0.206 \text{ ft}^2, \quad K_f=5.8 \end{array} \right\} \text{S.G. Sim.}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{J 23} \quad S=0.09 \text{ ft}^2, K_f=6.4 \\ \text{J 24} \quad S=0.09 \text{ ft}^2, K_f=0.39 \end{array} \right\} \text{Pump Sim.}$$

したがって  $0.09 \text{ ft}^2$  の流路面積に対して換算すると、蒸気発生器模擬体とポンプ模擬体の総合形状損失係数  $K_f$  (Sim.) は 9.0 となる。ただし J 24 の  $K_f$  は 6.4 とすべきところ入力データの誤りにより 0.39 となっている。

ケース(3)では蒸気発生器模擬体の形状損失係数はオリフィスに対する式、

$$K_f = 2.7(1-\beta)(1-\beta^2) \quad , \quad (4.1a)$$

$$\beta = \frac{\text{Junction Area}}{\text{Pipe Area}} \quad (4.1b)$$

から求めた。蒸気発生器を模擬した抵抗体 (Fig. 4.1 参照) は上昇部、下降部に 7 枚ずつの合計 14 枚で構成されている。そして 1 枚の抵抗板の流路断面積は  $0.206 \text{ ft}^2$  であり、抵抗板のない部分の流路断面積は  $1.161 \text{ ft}^2$  (抵抗板取付 4 ボルトの断面積を考慮すると  $1.037 \text{ ft}^2$  であり、この補正はケース(8)以後は正しく行われている) であり、(4.1b) 式の  $\beta$  は 0.17746 となる。したがって 1 枚の抵抗板の  $K_f$  は (4.1a) 式から 2.19 となり、7 枚の抵抗板による  $K_f$  はこの値を 7 倍して 15.3 となる。J 21, J 22 の流路面積は  $0.206 \text{ ft}^2$  であり、形状損失係数は蒸気発生器模擬体の入口および出口における損失を考慮しそれぞれ 16.2 および 15.7 とした。すなわち

$$\left. \begin{array}{l} \text{J 21} \quad S=0.206 \text{ ft}^2, K_f=16.2 \\ \text{J 22} \quad S=0.206 \text{ ft}^2, K_f=15.7 \end{array} \right\} \text{S.G. Sim.}$$

ポンプ模擬体 (Fig. 4.2 参照) の形状損失係数は模型実験<sup>[15]</sup>から求められたカップリング係数  $C_f=2.8$  を考慮して計算された。カップリング係数  $C_f$  は抵抗板が密接して置かれることにより流動抵抗が増大する効果を表わすものであり、 $n$  枚の密接に置かれた抵抗板の形状損失係数は

$$K_f = K_0 + \sum_{i=1}^{n-1} C_f K_0 \left( \frac{A_n}{A_i} \right)^2 \quad , \quad (4.2)$$

と与えられる。ここで  $K_0$  は  $n$  枚目の抵抗板の形状損失係数であり、 $A_i$  は  $i$  番目の抵抗板の流路面積である。ポンプ模擬体においては抵抗板の数  $n$  は 14、抵抗板の流路面積はすべて等しく  $0.10245 \text{ ft}^2$  であり、抵抗板のない部分の配管の流路断面積は  $0.68845 \text{ ft}^2$  である。1 枚の抵抗板の形状損失係数  $K_0$  は蒸気発生器模擬体の場合と同様、オリフィスに対する (4.1) 式から求めた。したがって、

$$\beta = \frac{0.10245}{0.68845} = 0.14881 \quad ,$$

$$K_0 = 2.7(1-\beta)(1-\beta^2) = 2.247$$

$K_0$  およびカップリング係数  $C_f=2.8$  を (4.2) 式に代入すれば、14 枚の抵抗板に対する

$K_f$  は 84.0 となる。J 23, J 24 の  $K_f$  としてはこの 1/2 の値を与えた。

すなわち,

$$\left. \begin{array}{l} \text{J 23} \quad S=0.09 \text{ ft}^2, \quad K_f=42.0 \\ \text{J 24} \quad S=0.09 \text{ ft}^2, \quad K_f=42.0 \end{array} \right\} \text{ Pump Sim.}$$

流路断面積  $0.09 \text{ ft}^2$  に換算すると蒸気発生器模擬体とポンプ模擬体の総合形状損失係数  $K_f$  (Sim.) は 90.1 となる。

またケース(3)では破断ループの流体温度を実験結果をもとに修正した。L 1-2 は  $540^\circ \text{F}$  の等温ブローダウンであるが破断前の定常運転時における破断ループの流量がごく少なくそのループ温度は  $540^\circ \text{F}$  よりかなり低い部分がある。破断ループの初期温度を以下に示す。

V 16	$540^\circ \text{F}$	低温側配管
V 25	$486^\circ \text{F}$	低温側配管破断口直上流ノズル
V 27	$530^\circ \text{F}$	低温側配管用再冠水補助バイパス
V 17	$535^\circ \text{F}$	高温側配管(H.L.)
V 18	$530^\circ \text{F}$	H.L.-S.G. 間配管
V 19	$520^\circ \text{F}$	蒸気発生器模擬体
V 20	$510^\circ \text{F}$	S.G.-Pump 間配管
V 21	$500^\circ \text{F}$	ポンプ模擬体
V 22	$475^\circ \text{F}$	高温側配管破断口直上流ボリューム
V 28	$530^\circ \text{F}$	高温側配管用再冠水補助バイパス

ケース(4)はケース(3)において破断ループのポンプ模擬体の  $K_f$  を決めるもととなった流路面積 ( $0.10245 \text{ ft}^2$ ) がジャンクションの流路面積 ( $0.09 \text{ ft}^2$ ) と少し異なる効果を補正したものである。J 23, 24 の  $K_f$  は流路面積の比の 2 乗 ( $=0.7717$ ) の補正がほどこされ 32.4 となる。

$$\left. \begin{array}{l} \text{J 21} \quad S=0.206 \text{ ft}^2, \quad K_f=16.2 \\ \text{J 22} \quad S=0.206 \text{ ft}^2, \quad K_f=15.7 \end{array} \right\} \text{ S.G. Sim.}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{J 23} \quad S=0.09 \text{ ft}^2, \quad K_f=32.4 \\ \text{J 24} \quad S=0.09 \text{ ft}^2, \quad K_f=32.4 \end{array} \right\} \text{ Pump Sim.}$$

この場合、流路面積  $0.09 \text{ ft}^2$  に換算すると蒸気発生器模擬体とポンプ模擬体の総合形状損失係数  $K_f$  (Sim.) は 70.9 となる。

またケース(4)においては破断ループの初期温度分布にさらに修正を加え、健全側ループの初期温度分布も測定データをもとにわずかではあるが修正をした。系の初期圧力分布も差圧の測定データをもとに修正した。各ボリュームの初期温度および初期圧力を以下に示す。ボリューム構成に関しては Fig. 3.1 を参照されたい。

Volume	Temp. (°F)	Press. (psia)	Volume	Temp. (°F)	Press. (psia)
1	539.0	2272.7	15	654.0	2269.7
2	540.0	2271.6	16	537.0	2281.7
3	539.5	2262.1	17	535.0	2272.7
4	539.0	2243.1	18	530.0	2271.2
5	538.0	2236.7	19	520.0	2269.7
6	540.0	2262.0	20	510.0	2272.7
7	540.0	2262.0	21	500.0	2275.8
8	540.0	2282.2	22	475.0	2272.7
9	540.0	2281.7	23	590.0	2271.1
10	539.0	2282.5	24	539.0	2279.2
11	538.0	2283.8	25	486.0	2281.7
12	539.0	2280.4	26	160.0	30.0
13	539.0	2274.5	27	528.0	2282.6
14	540.0	2276.9	28	528.0	2273.6

さらにケース(4)においては破断口 J 28, J 29 からの 2 相臨界流に対する放出係数  $C_D$  を以下の相関式(10)により, 流出クオリティ  $x$  の関数として与えている。

$$C_D = 0.57 + \frac{0.002}{x}, \quad (4.3)$$

ケース(5)は上部プレナムに水位の形成を仮定することにより解析結果にどんな影響が現われるかを調べたものである。そこでケース(4)を基準とし上部プレナムに対応するボリューム V13 および V14 に水位を仮定した。またそれに応じて上部プレナムに接続するジャンクション J15, J16, および J19 は Vertical junction<sup>[9]</sup> とした。

ケース(6)はケース(5)を基準とし, 破断ループのポンプ模擬体の形状損失係数  $K_f$  を(4.1)式におけるカップリング係数  $C_f$  を 1.0, すなわち各抵抗体の流動抵抗は上流側の抵抗体による流動変化の影響を受けないとして再評価した。したがってジャンクション J23 および J24 の  $K_f$  は 1 枚の抵抗体に対する値の 2.247 を 1.4 倍し, それにジャンクションの流路面積の補正 ( $\times 0.7717$ ) をほどこした値の 1/2 であり, 12.0 となる。

$$\left. \begin{array}{l} J21 \quad S=0.206 \text{ ft}^2, \quad K_f=16.2 \\ J22 \quad S=0.206 \text{ ft}^2, \quad K_f=15.7 \end{array} \right\} \text{S.G. Sim.}$$

$$\left. \begin{array}{l} J23 \quad S=0.09 \text{ ft}^2, \quad K_f=12.0 \\ J24 \quad S=0.09 \text{ ft}^2, \quad K_f=12.0 \end{array} \right\} \text{Pump Sim.}$$

この場合, 流路面積  $0.09 \text{ ft}^2$  に換算すると蒸気発生器模擬体とポンプ模擬体の総合流動抵抗係数  $K_f$  (Sim.) は 30.1 となる。

ケース(7)はケース(5)を基準とし, 破断ループのポンプ模擬体の形状損失係数  $K_f$  を模型実験<sup>[15]</sup>



による圧力損失のデータをもとに再評価したものである。抵抗体の形状損失係数 $K_f$ と圧力損失 $\Delta P$ 、質量流量 $G$ 、および流体密度 $\rho$ との関係は

$$\Delta P = K_f \frac{G^2}{2\rho}, \quad (4.4)$$

と与えられる。 $\Delta P$ をpsi,  $G$ をlb/sec,  $\rho$ をlb/ft<sup>3</sup>の単位で表わせば $K_f$ は(4.4)式から,

$$K_f = (288)g_c \cdot \frac{\Delta P \cdot \rho}{G^2}, \quad (4.5)$$

と与えられる。ここで $g_c$ は重力の加速度であり, 32.17 ft/sec<sup>2</sup>である。 $K_f$ は抵抗体での流路面積を基準に定義されている。ポンプ模擬体の模型実験において抵抗体の流路面積は0.0229 ft<sup>2</sup>であり, 配管の流路面積は0.1478 ft<sup>2</sup>である。したがって(4.1b)式における $\beta$ は,

$$\beta = \frac{0.0229}{0.1478} = 0.1549$$

となる。一方ポンプ模擬体自身の流路面積および配管断面積はそれぞれ0.10245 ft<sup>2</sup>と0.68845 ft<sup>2</sup>であり, その $\beta'$ は,

$$\beta' = \frac{0.10245}{0.68845} = 0.1488$$

となる。したがって模型実験における流動抵抗の模擬はよいことが分る。14枚の抵抗体による模型実験において圧力損失からその全形状損失係数は17.0と求められた。したがってポンプ模擬体の形状損失係数 $K_f$ は $\beta$ の差を補正して,

$$K_f = 17.0 \times \frac{2.247}{2.227} = 17.1$$

と求められる。ここで2.247および2.227はオリフィスに対する形状損失係数を求める式である(4.1)式をもとにポンプ模擬体およびその模型のそれぞれ1枚の抵抗板に対して $\beta$ から求めた形状損失係数である。したがってジャンクションJ23, J24に対する形状損失係数は17.1の半分の8.6となる。

$$\left. \begin{array}{l} \text{J 21} \quad S=0.206 \text{ ft}^2, \quad K_f=16.2 \\ \text{J 22} \quad S=0.206 \text{ ft}^2, \quad K_f=15.7 \end{array} \right\} \text{S.G. Sim.}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{J 23} \quad S=0.09 \text{ ft}^2, \quad K_f=8.6 \\ \text{J 24} \quad S=0.09 \text{ ft}^2, \quad K_f=8.6 \end{array} \right\} \text{Pump Sim.}$$

この場合, 流路面積0.09 ft<sup>2</sup>に対して換算した蒸気発生器模擬体とポンプ模擬体の総合形状損失係数 $K_f$ (Sim.)は23.3となる。

ケース(8)はケース(7)においてさらに蒸気発生器模擬体の形状損失係数をオリフィスに対する(4.1)式ではなく、縮小および拡大に対する損失係数の和として求めたものである。蒸気発生器模擬体の配管の流路断面積は  $1.0375 \text{ ft}^2$  であり、抵抗体内の流路面積は  $0.206 \text{ ft}^2$  である。したがって

$$\beta = \frac{0.206}{1.0375} = 0.19858$$

また流路の急縮小および急拡大にともなり形状損失係数<sup>[9]</sup>はそれぞれ、

$$K_f = 0.45(1-\beta), \quad \text{for a sudden contraction}, \quad (4.6)$$

$$K_f = (1-\beta)^2, \quad \text{for a sudden expansion}, \quad (4.7)$$

と与えられる。したがって蒸気発生器のそれぞれ7枚の抵抗板に対する  $K_f$  は、

$$\begin{aligned} K_f &= \{ 0.45(1-0.19858) + (1-0.19858)^2 \} \times 7 \\ &= (0.3606 + 0.6423) \times 7 \\ &= 7.02 \end{aligned}$$

となる。これに蒸気発生器模擬体の入口および出口における損失係数を加え、J21およびJ22の形状損失係数はそれぞれ7.9および7.4となる。したがって、

$$\begin{array}{l} \left. \begin{array}{l} \text{J 21} \quad S=0.206 \text{ ft}^2, \quad K_f=7.9 \\ \text{J 22} \quad S=0.206 \text{ ft}^2, \quad K_f=7.4 \end{array} \right\} \text{S.G. Sim.} \\ \left. \begin{array}{l} \text{J 23} \quad S=0.09 \text{ ft}^2, \quad K_f=8.6 \\ \text{J 24} \quad S=0.09 \text{ ft}^2, \quad K_f=8.6 \end{array} \right\} \text{Pump Sim.} \end{array}$$

この場合、流路面積  $0.09 \text{ ft}^2$  に対して換算した総合形状損失係数は20.1となる。

ケース(9)はケース(8)に対してポンプのデータを修正したものであり、以下のデータがとられた。修正前のデータは括弧内に示されている。

定格回転数 (rpm)	$N = 3530 (3530)$
初期回転数/定格値	$P^* = 0.6516 (0.6324)$
定格流量 (gal/min)	$Q = 5000 (5000)$
定格水頭 (ft)	$H = 330 (350)$
水力トルク ( $\text{lb}_f \cdot \text{ft}$ )	$T_h = 443 (465)$
摩擦トルク ( $\text{lb}_f \cdot \text{ft}$ )	$T_f = 110.7 (116.9)$
慣性モーメント ( $\text{lb}_m \cdot \text{ft}^2$ )	$I = 386 (521)$
定格密度 ( $\text{lb}_m/\text{ft}^3$ )	$\rho = 48.02 (38.75)$

ケース(9)の入力データリストを Appendix 1 に示す。

ケース(10), (11)はケース(9)を基準とし、ポンプの特性曲線を LOFT のポンプに対して入力したデータからそれぞれコードの内蔵データである Bingham Pump Company および

Westinghouse Electric Corporation のポンプの特性曲線に変更した場合である。

ケース(12)以後はケース(11)以前のケースと比較してボリュームの切り方が異なっており、ボリュームのデータの全面的な再検討を行った。ケース(12)の RELAP-4 J コードに対する入力データリストを Appendix 2 に示す。ボリュームの切り方でももに異なっているのは炉心バイパスを無視した点および破断ループのうち高温側配管に接続するボリュームの切り方である (Fig. 3.2 参照)。破断ループの高温側配管に接続する蒸気発生器模擬体はボリューム V17, V18 で表わされ、その形状損失係数は J19, J20, J21 の 3 ジャンクションに分けて与えられる。J20 は蒸気発生器模擬体の中間点の折れ曲っている個所に設けられており、その流路面積は  $0.206 \text{ ft}^2$  であり、形状損失係数  $K_f$  は 7 枚の抵抗板に対する値の 7.02 をとった。J19, J21 はそれぞれ蒸気発生器模擬体の入口および出口に対応するジャンクションであり、その流路面積は  $0.09 \text{ ft}^2$  をとった。蒸気発生器模擬体内の流路面積は  $1.0375 \text{ ft}^2$  であるからその入口および出口の形状損失係数はそれぞれ (4.7) 式, (4.6) 式から 0.85 および 0.42 と与えられる。したがって J19 および J21 に対する  $K_f$  は 0.85 および 0.42 に 3.5 枚の抵抗板に対応する値

$$7.02 \times \left( \frac{0.09}{0.206} \right)^2 \times \frac{1}{2} = 0.67$$

を加え 1.52 および 1.09 と与えられる。したがって、蒸気発生器模擬体の形状損失係数は以下のごとくなる。

$$\left. \begin{array}{l} \text{J19} \quad S=0.09 \text{ ft}^2, \quad K_f=1.52 \\ \text{J20} \quad S=0.206 \text{ ft}^2, \quad K_f=7.02 \\ \text{J21} \quad S=0.09 \text{ ft}^2, \quad K_f=1.09 \end{array} \right\} \text{S.G. Sim.}$$

またケース(12)においては破断ループの高温側配管に接続するポンプ模擬体は 1 つのジャンクション J22 で表わされ、その流路面積は  $0.09 \text{ ft}^2$  であり、 $K_f$  はケース(7)の説明から明らかごとく 17.1 となる。

$$\text{J22} \quad S=0.09 \text{ ft}^2, \quad K_f=17.1 \quad \left. \right\} \text{Pump Sim.}$$

この場合、流路面積  $0.09 \text{ ft}^2$  に対して換算すると総合形状損失係数  $K_f$  (Sim.) は 21.1 となる。

ケース(12)においてはダウンカマールボリューム V11 に SUS 製の熱源構造体が考慮されている。形状は平板であり、厚さは  $0.84 \text{ ft}$ 、伝熱面積はダウンカマールにおける流体と構造材との全接触面積をとり  $820.3 \text{ ft}^2$  とした。体積も全構造体の体積に等しく  $482.5 \text{ ft}^3$  とした。また流動に対する等価直径はダウンカマールボリュームに対する値の  $0.162 \text{ ft}$  に等しくなっている。

ケース(13)はケース(12)を基準とし、ダウンカマールボリューム V11 に水位を考慮したものである。

ケース(14)はケース(12)を基準とし、ダウンカマールボリューム V11 の熱源構造体を無視したものである。ケース(12)の解析結果と比較することによりダウンカマールの構造体による水の加熱が

解析結果にどのような影響を及ぼすかを調べることが出来る。またケース(11)と比較することによりボリュームの切り方が解析結果にどう影響するかを検討することが可能である。

ケース(15)においてはダウンカメラ以外のボリュームにも熱源構造体を考慮し、合計21のボリュームに熱源構造体を付けた。ケース(15)の入力データリストをAppendix 3 に示す。

ケース(16)～(22) は加圧器内での圧力および水位の時間変化に大きな影響を及ぼすパラメータを調べるために行った解析である。ケース(16)では加圧器からのサージラインを2ボリュームに分割して解析した。ケース(17)では加圧器サージラインの配管の直角の曲りによる圧力損失を考慮し、サージライン中間のジャンクションJ 30の形状損失係数 $K_f$ を0.9として解析した。

ケース(18)では加圧器および加圧器サージラインのデータが改訂された。加圧器サージラインが加圧器内に入っている効果を考慮するため、ボリュームV28(Fig. 3.3 参照)の高さは6.28 in 高くして0.664 ftとし、ジャンクションJ27の位置も4 in 高くして4.181 ftとした。J27はVertical junctionとして取扱い、その流路面積は0.0504 ft<sup>2</sup>である。また加圧器ボリュームV22の等価直径 $d$ 、流路断面積 $S$ 、水位M.L.、ボリューム高さ $h$ 、および体積 $V$ は以下のように改訂した。

$$d = 2.78 \text{ ft} \quad (\text{図面から})$$

$$S = 6.08 \text{ ft}^2$$

$$M.L. = 21 \text{ ft}^3 / 6.08 \text{ ft}^2 = 3.454 \text{ ft}$$

$$h = 5.97 \text{ ft} \quad (\text{図面から})$$

$$V = 6.08 \text{ ft}^2 \times 5.97 \text{ ft} = 36.3 \text{ ft}^3$$

ケース(18)の入力データリストをAppendix 4 に示す。

ケース(19)はケース(18)を基準とし、加圧器内の水面下のボイド分布は一様( $C_x = 0.0$ )とし、気泡離脱速度にWilson<sup>(16)</sup>の相関式を使った場合である。

ケース(20)はケース(19)を基準とし、加圧器内の初期圧力を2269.7 psia から2120 psia に下げ、さらに加圧器内にSUS製の熱源構造体を考慮した場合である。熱源構造体の形状は平板と仮定し、その厚さ $t$ 、伝熱面積 $S$ 、および体積 $V$ はそれぞれ、

$$t = 0.25 \text{ ft}$$

$$S = 64.3 \text{ ft}^2$$

$$V = 16.1 \text{ ft}^3$$

とした。

ケース(21)、(22)はいずれもケース(19)を基準とし、加圧器サージラインから一次冷却系に接続するジャンクションJ28における2相臨界流の放出係数 $C_D$ を基準ケースの0.57からそれぞれ0.47、0.38と小さくした場合である。ただしケース(21)では $C_D$ は0.47で一定であるのに対し、ケース(22)では $C_D$ は

$$C_D = 0.38 + \frac{0.002}{x} \quad (4.8)$$

とJ28のクオリティ $x$ の関数で与えられる。

ケース(23)はケース(19)を基準とし、圧力容器側破断口直上流のノズルのボリュームV27をジ

ジャンクションとして取扱った場合である。そのためジャンクション J 2 6 の形状損失係数  $K_f$  はケース(19)におけるジャンクション J 2 9 の値を加えて 1.39 とし、幾何学的慣性も J 2 9 の値を加えて  $23.06 \text{ 1/ft}$  とした。本ケースはノズルに対応する V 2 7 のような小さな流体ボリュームをなくし計算時間を節約することを目的としている。

#### 4.2 破断ループの形状損失係数の効果

健全ループには破断前に定格流量に対応する流れがあり、初期圧力分布さえ正しく与えておけば各ジャンクションの等価な圧力損失係数はコード内で正しく求められる。しかし LOFT 炉の冷却系は  $1 \frac{1}{2}$  ループと呼ばれるものであり、破断ループの初期流量は零であり、破断前も初期温度を設定するためのごく僅かな流量があるにすぎない。したがって流れにともなう圧力損失もほとんどなく、各部の圧力損失係数は初期圧力分布から求めることは出来ず、入力データとして与えることが必要である。破断ループの損失係数は破断口からの流出流量、したがって系全体のブローダウン過程に支配的な影響を及ぼし、精度よく与えることが必要である。とくに破断ループの蒸気発生器およびポンプは流動抵抗体で模擬されており、その損失係数は解析結果に大きな影響を及ぼす。

Table 4.1 に示されたケース(1), (2), (3), (4), (6), (7), および(8)の解析結果を比較することにより、破断ループの圧力損失係数、なかんずく蒸気発生器模擬体およびポンプ模擬体の形状損失係数が解析結果にどのような影響を及ぼすかを調べることが出来る。ケース(6), (7), (8)においては上部プレナムに水位が考慮されているがその効果は後で検討する如く小さい。またケース(1), (2), (3)は初期温度分布および圧力分布がやゝ異なり、2相臨界流に対する放出係数  $C_D$  も一定値 0.6 が与えられている。しかしこれらの影響はいずれも小さいと考えられる。

ケース(1), (2), (3), (4), (6), (7), および(8)における健全ループの低温配管の圧力の解析結果を実験結果と比較して Fig. 4.3 に示す。また Fig. 4.4 には破断後 10 秒, 20 秒, および 30 秒における圧力の計算値の実験結果からのずれを総合形状損失係数  $K_f$  (Sim.) の関数として示す。ここで  $K_f$  (Sim.) は流路断面積  $0.09 \text{ ft}^2$  に対して換算した蒸気発生器模擬体およびポンプ模擬体の形状損失係数の和として定義される。

Fig. 4.3 から系の圧力の時間変化が破断ループの蒸気発生器模擬体およびポンプ模擬体の形状損失係数に大きく依存することが分る。ケース(1)では蒸気発生器模擬体およびポンプ模擬体を無視した場合であり、その形状損失係数はボリュームとジャンクションの面積変化のみから与えられる小さな値となっている。したがって圧力低下も当然、実験結果と比較して非常に速くなっている。ケース(2)は INEL において行われた L 1-3 実験の予備解析<sup>[13]</sup>で使われている形状損失係数を使った場合であり、あまり意味はない。ケース(4)においては蒸気発生器模擬体およびポンプ模擬体の抵抗板 1 枚あたりの形状損失係数  $K_0$  はオリフィスの式で求め、抵抗板相互のカップリング係数  $C_f$  は蒸気発生器模擬体に対しては 1.0, ポンプ模擬体に対しては模型実験から求められた 2.8 を使い  $K_f$  を求めた。この場合、系の圧力は実験結果と比較して低下が遅く、 $K_0$  または  $C_f$  が大きいことが推定される。

そこでケース(6)においては  $C_f$  を 1.0 として  $K_f$  を求め解析した。系の圧力の時間変化は実験結果とよく一致している。またケース(7)はポンプ模擬体に対する模型実験<sup>[15]</sup>による  $K_f$  に

$\beta$  の差による補正をほどこして解析した場合であり、この場合にも圧力の時間変化は実験結果とよく一致する。Fig. 4.4には蒸気発生器模擬体とポンプ模擬体の総合形状損失係数 $K_f$  (Sim.) の関数として圧力の計算結果の実験結果からのずれが示されているが、この図から30秒以内の圧力の時間変化を最もよく再現する $K_f$  (Sim.) は2.5近傍の値であり、 $K_f$  (Sim.) が1.5から4.0の間であれば圧力の計算誤差は $\pm 40$  psi の範囲にほぼおさまることが分る。Fig. 4.4に示されたケースのうちこの基準を満足するのはケース(6), (7), (8)の3ケースである。

ここでポンプ模擬体の流動抵抗に対する模型実験の結果<sup>[15]</sup>を検討し、蒸気発生器模擬体およびポンプ模擬体の形状損失係数 $K_f$  はいかに与えるべきかを再検討する。流路面積比 $\beta$  が0.168の抵抗板1枚、2枚、8枚、14枚に対する $K_f$  はそれぞれ0.67, 2.2, 9.0, 17.1と測定された。<sup>[15]</sup>したがって(4.2)式をもとにカップリング係数を求めると、

No. of Plates	$K_f$	$C_f$
1	0.67	—
2	2.2	2.2
8	9.0	1.7
14	17.1	1.8

となる。 $C_f$  は抵抗板の枚数が多い場合にはほぼ一定の値となっているが、2枚の場合にはかなり大きめの値である。しかし参考文献[15]で結論づけられている $C_f = 2.8$  よりいずれもかなり小さい値であり、これは1.8の誤りでないかと考えられる。

$\beta = 0.168$  の抵抗板の $K_f$  をオリフィスの式(4.1)、および流路の縮小と拡大の組合せと考え(4.6)と(4.7)式を使って計算すると以下のようになる。

	$K_f (\beta = 0.168)$
Experiment	0.67
Orifice	2.18
Contraction	0.37
Expansion	0.69
Cont.+Expans.	1.06

$K_f$  の測定値はいずれよりも小さく、拡大のみの値にむしろ近い。鋭くとがったエッジをもつオリフィスに対する式はいま考えているような抵抗板には適用できないことが分る。また多くの穴があいた抵抗板に対しては単孔を想定した縮小拡大の式をそのまま適用することはできず $0.67/1.06 = 0.63$ の補正係数が必要である。そこで蒸気発生器模擬体およびポンプ模擬体の抵抗板1枚の $K_f$  には以下の式を適用するものとする。

$$K_f = 0.63 \{ 0.45(1-\beta) + (1-\beta)^2 \} \quad (4.9)$$

ここで蒸気発生器模擬体およびポンプ模擬体の $\beta$  を正確に求めなおす。抵抗板部分における流路面積としては穴の部分( $S_0$ )のみでなく配管とオリフィスとの間の部分( $S_A$ )も考慮する必要がある。抵抗板以外の部分の流路面積は配管の面積( $S_p$ )から抵抗板取

付ボルトの断面積 ( $S_B$ ) を差し引いて求められる。したがって  $\beta$  は

$$\beta = \frac{S_O + S_A}{S_P - S_B}$$

と表わされ、以下の如くなる。

	S.G. Sim.	Pump Sim.	Pump Sim. Model
$S_O$ (ft <sup>2</sup> )	0.206	0.102	0.0229
$S_A$ (ft <sup>2</sup> )	0.017	0.006	0.0015
$S_O + S_A$ (ft <sup>2</sup> )	0.223	0.108	0.0244
$S_P$ (ft <sup>2</sup> )	1.163	0.694	0.1478
$S_B$ (ft <sup>2</sup> )	0.100	0.062	0.0027
$S_P - S_B$ (ft <sup>2</sup> )	1.06	0.632	0.145
$\beta$	0.210	0.171	0.168

(4.9)式で1枚の抵抗板の損失係数をもとめ、カップリング係数  $C_f$  を蒸気発生器模擬体に対しては1.0, ポンプ模擬体に対しては1.8とし、それぞれの  $K_f$  を計算すると次のようになる。

	S.G. Sim.	Pump Sim.
$\beta$	0.210	0.171
$K_f$ (1 Plate)	0.617	0.668
$K_f$ (7 Plates)	4.32	
$K_f$ (14 Plates)	8.64	16.3

蒸気発生器模擬体の抵抗板は上向流部分に7枚, 下向流部分に7枚の合計14枚あり, 全抵抗板による損失係数  $K_f$  は7枚に対する値の2倍となっている。蒸気発生器模擬体の入口および出口における  $K_f$  はそれぞれ(4.7), (4.6)式から0.84, 0.41と与えられており, ケース(13)の計算体系における蒸気発生器模擬体およびポンプ模擬体に関係したジャンクションの  $K_f$  の推奨値は

$$\left. \begin{array}{l} \text{J 19 } S=0.0899 \text{ ft}^2, K_f=1.2 \\ \text{J 20 } S=0.223 \text{ ft}^2, K_f=4.3 \\ \text{J 21 } S=0.0899 \text{ ft}^2, K_f=0.8 \end{array} \right\} \text{S.G. Sim.}$$

$$\text{J 22 } S=0.108 \text{ ft}^2, K_f=16.3 \text{ } \left. \vphantom{\begin{array}{l} \text{J 19} \\ \text{J 20} \\ \text{J 21} \end{array}} \right\} \text{Pump Sim.}$$

と与えられる。この場合  $0.09 \text{ ft}^2$  の流路面積に対して換算すると蒸気発生器模擬体とポンプ模擬体の総合形状損失係数  $K_f$  (Sim.) は14.0となる。

#### 4.3 ポンプ特性が解析結果に及ぼす影響

ケース(9)はケース(8)を基準とし健全ループのポンプの定格値および初期条件に4.1節で述べた修正を加えたものであり, ケース(10), (11)はケース(9)を基準としポンプの特性曲線を入力データからそれぞれコードに組込まれている Bingham Pump Company および Westinghouse

Electric Corporation のものに変更したものである。したがってこれらの解析ケースを比較することによりポンプ特性が解析結果に及ぼす影響を調べることができる。

ケース(8)~(11)の解析結果のうち、健全ループの低温側配管における圧力と流量および炉心入口流量の時間変化を比較してTable 4.2~Table 4.4に示す。これらの結果から等温ブローダウンにおいては圧力の時間変化にポンプ特性はほとんど影響を与えないことが分る。解析した範囲において健全ループの低温側配管における圧力の変化は5 psi 以下だった。これは健全ループおよび圧力容器内で循環流量が少々変わっても破断口からの流出流量にほとんど影響しないためであると考えられる。これは等温ブローダウンのためであり、炉心において発熱がある場合には蒸気発生量のちがいをとらしてポンプ特性は流動状態および被覆管表面温度に大きな影響を及ぼすと考えられる。Table 4.3 およびTable 4.4 から明らかのごとく健全ループ内の流量および炉心入口流量はポンプ特性によりかなり大きく変化する。LOFT 炉のポンプ特性には2相流特性のみならず单相流特性にも不明確な点が多く、L2シリーズの核加熱による実験を行う前に測定および計算モデルの両面からその特性を明確にし、解析モデルをより現実的なものに改良しておくことが必要である。

#### 4.4 水位の存在が解析結果に及ぼす影響

LOFT(L1-2)実験の解析において水位を考慮したのは加圧器、サブプレッションタンク、上部プレナム、ダウンカマー、および蒸気発生器上向流側ボリュームの5ヶ所のみである。加圧器およびサブプレッションタンクには破断前に必ず水位が存在し、蒸気発生器上向流側ボリュームには常に水位の形成を仮定して解析した。結局、水位を仮定することにより解析結果にいかなる影響が現われるかを調べたのは上部プレナムおよびダウンカマーの2ボリュームである。Table 4.1の解析ケースのうちケース(4)、(5)が上部プレナムの水位の効果を調べたものであり、ケース(12)、(13)がダウンカマーの水位の効果を調べたものである。

Table 4.5に健全ループ低温側配管における圧力の時間変化をケース(4)と(5)を比較して示す。上部プレナムにおける水位の有無が系の圧力に及ぼす影響が非常に小さいことが分る。上部プレナムの水位が高温側配管まで達する8~10秒以前における系の圧力差はほとんど零であり、水位が高温側配管に達した後は水位を仮定しない場合と比較して圧力はやゝ速く低下するがその差は5 psi 以下と小さい。L1-2は低温側配管の破断実験であるため、高温側配管に接続した破断ループには蒸気発生器模擬体とポンプ模擬体という2つの大きな流動抵抗体があり、上部プレナムの水位が直接には破断流量に影響を及ぼさず、圧力差が小さかったと考えられる。逆に高温側配管の破断実験の場合には上部プレナムの水位は解析結果に直接大きな影響を及ぼすと考えられる。

Fig. 4.5にケース(12)、(13)における健全ループ低温側配管の圧力の時間変化を実験結果と比較して示す。ダウンカマーの水位が低温側配管に達する7.1秒より前には圧力の差はほとんどない。しかし水位が低温側配管に達した後は時間とともに両ケースにおける系の圧力の計算結果の差は大きくなる。これはダウンカマーに水位を仮定した場合のケース(13)の方が均質として取扱ったケース(12)と比較して圧力容器側破断口からの流出クオリティーが高く、流出流量が小さくなるためである(Fig. 4.6, 4.7 参照)。水位が低温側配管に達した後しばらくケース



13)の方がケース12)より圧力が低いのは流出クオリティーが高く蒸気がより多く流出するためであり、その後しだいに流出流量が少なく圧力容器内の残存水量が多い効果が現われケース13)の方が逆に圧力が高くなる。圧力の時間変化はダウンカマーに水位を仮定した場合の方が実験結果との一致がよい。

Fig. 4.6~Fig. 4.8 にはダウンカマーに水位を仮定したケース13)における圧力容器側破断口からの流出流量とクオリティーおよび破断ループ低温側配管における密度の時間変化をダウンカマーを均質として取扱ったケース12)の結果と比較して示す。ダウンカマー水位が低温側配管の上端に達する7.1秒以前には両ケースの解析結果にはほとんど差がない。破断後7.1秒以後ダウンカマーに水位を仮定したケース13)における圧力容器側破断口からの流出流量は均質として取扱ったケース12)と比較すると小さくなる(Fig. 4.6参照)。また流出クオリティー(Fig. 4.7参照)はケース12)より大きくなる。破断ループ低温側配管における密度(Fig. 4.8参照)はケース12)では滑らかに低下したのに対しダウンカマーに水位を仮定したケース13)では7.1秒以後急激な低下がある。Fig. 4.8 には密度の測定結果も示されており、測定結果との一致度もケース13)の方がよい。

以上見てきたごとく系の圧力および破断ループ低温側配管における密度の時間変化はダウンカマーに水位を仮定した解析の方が実験結果とよく一致している。実験的にもダウンカマーでの水位の形成は確認されている。したがって解析にさいしては当然ダウンカマーの水位は考慮すべきである。

低温側配管の破断においてはダウンカマーから破断口までの流動抵抗が小さく、ダウンカマーの水位は解析結果に直接大きな影響を及ぼした。逆に高温側配管の破断の場合には上位プレナムの水位の方が重要であり、ダウンカマーの水位は解析結果にたいした影響は与えないと推定される。

#### 4.5 ボリューム構成が解析結果に及ぼす影響

この節ではボリュームの切り方が解析結果にどう影響を及ぼすかを調べる。ケース14)はケース(9)を基準とし、ボリュームおよびジャンクションのデータの全面的見直しを行いその改訂を行ったものである。またボリューム構成に関しては高温側配管に接続した破断ループのボリュームの切り方がより現実的となり各機器および配管との対応づけがより良くなっている。またケース(9)で考慮されていた炉心バイパスは流路面積が小さいとして炉心ボリュームに加えられ、2つのボリュームに分れていた上部プレナムは1つのボリュームに統合された。ケース14)においては加圧器の影響をより正しく考慮するため、そのサージラインから1次冷却系に入った部分に1ボリューム追加した。

ケース(9)および14)による健全ループの低温側配管の圧力の計算結果を実験結果と比較してFig. 4.9に示す。改訂したケース14)の方がケース(9)と比較して系の圧力は全般的に低くなっており、その差は最大約60 psiとなっている。かなり大幅なボリューム構成の変化の割には圧力の変化は小さいと考えることが出来る。圧力の時間変化の実験結果とは改訂前のケース(9)の方がよく一致している。しかしこれらのケースではダウンカマーに水位および熱源構造体を考慮していず、ケース14)にこの2つの効果を取り入れたケース15)は実験結果と良く一致し、一

致度はケース(9)より優れている。ケース(9)に上記の2つの効果を考慮すると実験結果より系の圧力はかなり高くなると考えられる。

ケース(19)とケース(23)との差は圧力容器側破断口直上流に取り付けられたノズルの取り扱い方にあり、ケース(19)ではそれを1つのボリュームとして取扱い、ケース(23)ではその形状損失係数および幾何学的慣性を破断口ジャンクションに含めている。両ケースにおける健全ループ低温側配管中の圧力の時間変化の計算結果を実験結果と比較して同じくFig. 4.9に示す。ノズルを破断口ジャンクションに含めて解析したケース(23)における系圧力の計算結果はノズルをボリュームとして取扱ったケース(19)の結果と大幅にずれる。また実験結果と比較しても広い時間範囲において150psi程度のずれがある。これは破断後約10秒までの短い時間における圧力容器側破断口からの流出流量がケース(23)の方が多いためである。その原因としてはケース(23)ではノズル・ボリュームにおける摩擦抵抗を考慮していない点が考えられるが、まだ明確な結論は得られていない。ノズル・ボリュームは長さ、体積ともに大変小さく、このボリュームの存在がタイムステップを大きく出来ない主要な原因となっている。従ってノズル・ボリュームの特性を破断口ジャンクションに含めてジャンクションとして取扱うことが可能なら計算時間は大幅に短縮される。しかし現状においてはノズルはボリュームとして取扱わざるを得ない。

#### 4.6 熱源構造体が解析結果に及ぼす効果

LOFT炉の一次冷却系内の各構造体および配管は破断前の定常運転により一次冷却系内の水の温度とほぼ等しくなる。従って破断後ある程度時間がたち、一次冷却系内の水の温度が低下するにつれて構造材による水の加熱が問題となり、蒸気発生をとりし系の圧力および水の流動挙動に影響を及ぼすと考えられる。そこで本節においては熱源としての構造体が解析結果に及ぼす影響を検討する。L1シリーズでは炉心は抵抗体で模擬され燃料がないのでおもに問題となるのは、流路面積が小さく、伝熱面積および構造体体積の大きいダウンカマーであると考えられる。

ケース(12)~(15)における健全ループ低温側配管の圧力の計算結果を比較してFig. 4.10に示す。ケース(14)は熱源構造体をまったく考慮しなかった場合である。ケース(15)においては加圧器、加圧器サージライン、破断ループ・ノズル、破断ループの再冠水補助ループ、およびサブプレッションタンク以外のすべてのボリュームに熱源構造体が考慮されている。ケース(12)と(13)はダウンカマーのみに熱源構造体を考慮した場合であり、ケース(12)はケース(14)と比較するためダウンカマーを均質として取扱い、ケース(13)はケース(15)と比較するためダウンカマーに水位を仮定している。

ケース(12)と(14)との比較からダウンカマーの熱源構造体が解析結果にかなり大きな影響を与えることが分る。系の圧力は破断後10秒以後、ダウンカマーに熱源構造体を考慮したケース(12)の方が高くなりケース(14)との差は最大40psiに達する。両ケースの差は長い時間範囲にわたっており、30秒以後熱源構造体の影響が小さくなるのはダウンカマーのクオリティー上昇および流速の低下により水への熱伝達率が低下したためである。

ケース(13)と(15)との比較からダウンカマー以外における熱源構造体は解析結果にほとんど影響を

及ぼさないことが分る。解析した時間範囲における系の圧力の計算結果の差は10 psi以下である。ブローダウンが終了した後の再冠水過程においてはダウンカマー以外の熱源構造体が解析結果にある程度の影響を及ぼす可能性は一応あるが、再冠水が問題となるのは炉心に燃料がある場合であり、この場合には燃料の発熱が支配的であり、やはりダウンカマー以外の熱源構造体の影響は小さいと考えられる。

#### 4.7 加圧器の取扱い方が解析結果に及ぼす効果

破断ループの蒸気発生器模擬体とポンプ模擬体の総合形状損失係数 $K_f$  (Sim.) を21.1とし、ダウンカマーの水位と熱源構造体を考慮したケース(13)の解析により系の圧力の時間変化は実験結果とほぼ満足すべき一致をえた。しかし加圧器内の圧力は実験結果より速く低下し一次冷却系の圧力に近づいた。これは加圧器内の水位が実験結果より速く低下して零となったためであると考えられる。加圧器およびそのサージラインも破断ループ同様定格運転時には流れがなく、初期圧力分布から流動抵抗を決めることが出来ない。したがってその形状損失係数は正確に与える必要がある。本節においては加圧器の圧力および水位に大きな影響を与えると考えられるパラメータについて検討する。ケース(16)ではサージラインを2ボリュームに分割した。ケース(17)ではサージラインの曲りによる損失係数 $K_f$ として0.9を考慮した。ケース(18)では加圧器およびサージラインの形状の修正を行い加圧器からサージラインへの出口を4インチ高くした。ケース(19)では加圧器内の気泡離脱速度にWilsonの相関式<sup>[16]</sup>を使った。ケース(20)では加圧器の熱源構造体を考慮し、初期圧力を2120 psiaに下げた。初期圧力を下げたのは加圧器内の電気ヒータより下の部分に未飽和水が存在することを仮定したことに対応する。ケース(21)、(22)ではサージラインと一次冷却系とを接続するジャンクションの2相臨界流の放出係数 $C_D$ をそれぞれ0.47および0.38に変化させた。これはサージラインの流動抵抗を変えたこととほぼ等価である。

ケース(16)~(22)における加圧器内圧力の時間変化を基準ケース(13)の結果および実験結果と比較してFig. 4.11, 4.12に示す。また水位の時間変化をFig. 4.13, 4.14に示す。ただしケース(16)の圧力は基準ケース(13)よりわずかに高いだけであるので省略されている。

解析結果から以下の点が明らかとなった。2相臨界流の放出係数 $C_D$ を小さくしたケース(21)、(22)以外のケースにおいては、加圧器の圧力は基準ケース(13)の結果より僅かに高いだけであり、実験結果とは依然大きな差がある。 $C_D$ を小さくするにつれて計算結果は実験結果に近づき、 $C_D$ を0.38としたケース(22)の圧力の時間変化は実験結果とかなりよく一致している。しかし $C_D$ を0.38と小さくすることに対応する余分な流動抵抗は加圧器およびサージラインの図面からは見い出されない。したがって実際にLOFT炉で使用されているサージラインの流動抵抗を測定し確認することが必要である。

加圧器の水位の計算結果と実験結果との不一致は圧力の場合よりさらに大きい。ケース(17)より前のケースにおいては加圧器の断面積が小さすぎるため初期水位は実験値よりかなり大きくなっている。またサージラインの加圧器内に入っている部分を考慮していないため、実験結果では水位がほぼ一定値におちつくのにたいして計算結果では水位は零となる。ケース(18)以後においては加圧器の断面積とサージラインに修正を加えたので実験結果との差は比較的少なくな

った。初期水位の実験結果をもとに加圧器の断面積を決めると加圧器の壁厚が小さくなりすぎ  
 ため断面積は推定値を使った。またL1-3A<sup>(17)</sup>の初期水位から求めた断面積は今回の推  
 定値に近い。L1-3Aの初期水位をもとに初期水量の補正を行ってL1-2の初期水位を推  
 定すると3.43 ftとなり、計算値の3.45 ftとよく一致する。水位の実験結果と圧力の実  
 験結果との間にも矛盾がある。計算結果においては水位がサージライン入口に達すると加圧器  
 内の蒸気が直接流出し加圧器の圧力は急激に減少する。ところが実験結果においては加圧器の  
 水位がサージライン入口に達するのが約1.4秒であるのに対して、加圧器の圧力はそれより  
 かなり前の約1.1秒から急速な減少を開始する。圧力の測定に大きな誤差があるとは考えられ  
 ず水位の測定に何らかの誤差があったと考えられる。水位の実験値は加圧器の上下差圧を換算  
 したものであり、その換算方法を明確にすることが必要であり、それと同時に水位の測定誤差  
 を推定する必要がある。また加圧器内に数点のon-off水位計をつけることも有効である  
 と考えられる。

Fig. 4.15~Fig. 4.21 に加圧器サージライン出口の2相臨界流放出係数 $C_D$ を0.38  
 としたケース(22)の解析結果のうち、加圧器サージライン出口流量、上部プレナム水位、健全ル  
 ープ低温側配管圧力、健全ループ高温側配管密度、破断ループ高温側配管密度、健全ループ低  
 温側配管密度、および破断ループ低温側配管密度を $C_D$ を0.57としたケース(18)の結果と比較  
 して示す。加圧器サージライン出口流量は $C_D$ を0.57から0.38と約0.7倍にしたのに対応  
 しケース(18)の結果の約0.7倍と小さくなっている。それに応じて加圧器の水位が出口配管の上  
 端に達する時間は遅くなり(Fig. 4.14 参照)、それに対応する加圧器サージラインの流量  
 が急減する時間は破断後10.6秒と、ケース(18)における値の8.1秒の約1.3倍の大きになっ  
 ている(Fig. 4.15 参照)。Fig. 4.16 に示された上部プレナムの水位は基準ケース(18)の  
 結果と比較して高温側配管の下端に達する時間が遅くなっている。これは加圧器からの流出流  
 量が少なく加圧器の効果が長もちしたためであり、破断後10.6秒から再び上部プレナムの水  
 位が低下し始めるのは加圧器の水位が出口配管上端に達しサージラインの出口流量が急減する  
 時間に対応している。健全ループの圧力(Fig. 4.17 参照)は加圧器からの流入流量が減り  
 流入時間が延びることに対応し、基準ケース(18)と比較して破断後1.4秒近傍までは低く以後高  
 くなる傾向にある。破断後短時間においては基準ケース(18)より圧力の実験結果にやゝ近づくが、  
 30秒以後において実験結果よりやゝ圧力が高くなる傾向がある。加圧器の圧力の時間変化が  
 実験結果に近づけば健全ループおよび破断ループの高温側配管における密度の時間変化(Fig.  
 4.18, Fig. 4.19 参照)も実験結果に近づくと期待された。破断後10秒後までの高温  
 側配管における密度は基準ケース(18)と比較して実験結果に確かに近づくが、実験結果との矛盾  
 はなお大きい。健全ループ高温側配管における破断後2.4秒および3.6秒近傍における密度の  
 ピーク位置は基準ケース(18)と比較して実験結果に近づくと傾向にある。高温側配管における密度  
 がサージライン出口の $C_D$ を0.38にとることにより基準ケースにやゝ近づくと反対に、健  
 全ループおよび破断ループの低温側配管における密度の計算結果は実験値からやゝずれる傾向  
 にある(Fig. 4.20, Fig. 4.21 参照)。

#### 4.8 解析結果

ケース18を基準ケースと考え、LOFTのL1-2等温ブローダウン実験にともなう各部流体条件の時間変化を解析結果をもとに調べる。ケース18においては破断ループの蒸気発生器模擬体とポンプ模擬体の総合形状損失係数 $K_f$  (Sim.) は流路面積 $0.09 \text{ ft}^2$  に対して2.1.1であり、熱源構造体を考慮したのはダウンカマーのみである。水位は健全ループ蒸気発生器の入口側ボリューム、上部プレナム、ダウンカマー、加圧器、およびサブプレッショントタンクに考慮した。また加圧器サージラインの曲りに対して0.9の形状損失係数を考慮した。おもな解析結果をFig. 4.22~4.46に示す。

Fig. 4.22に圧力容器側破断口およびループ側破断口からの流出流量がそれぞれ破断ループの低温側配管および高温側配管における流量と比較して示した。またそれぞれの流れクオリティーをFig. 4.23に示した。Fig. 4.22から圧力容器側破断口からの流出流量の方がループ側破断口からの流出流量より大きいことが分る。両者の差は圧力容器から破断までの流動抵抗の差によっており、圧力容器側破断口までには問題となるような流動抵抗が無いのに対し、圧力容器とループ側破断口の間には蒸気発生器模擬体とポンプ模擬体という2つの大きな抵抗体がある。とくにポンプ模擬体の流動抵抗は大きい。低温側配管および高温側配管の流量はそれぞれダウンカマーおよび上部プレナムの沸騰開始にともない小さくなる。ダウンカマーおよび上部プレナムが飽和して沸騰を開始するのはそれぞれ破断後2.3秒および3.5秒である。低温側配管の流量の低下割合が小さいのは健全ループからダウンカマーへの流入によりダウンカマーのクオリティーが低く保たれていることによっている。また低温側配管および高温側配管の流量はそれぞれダウンカマーおよび上部プレナムの水位が配管の上端まで低下するとともに小さくなる。ダウンカマーおよび上部プレナムの水位が配管の上端に達するのはそれぞれ破断後6.8秒および7.4秒である。低温側配管の流量の減少割合が小さいのはダウンカマー水位が配管の中間位置に一定に保たれることになっている。ダウンカマー水位が一定に保たれるのはダウンカマーの流体体積が大きいこと、および健全ループからダウンカマーへの流入が大きいことによっている。いっぽう上部プレナムの水位はどんどん低下し破断後8.5秒には配管の下端以下となり、それにともない高温側配管の流量は大きく低下する。また上部プレナムの水位が破断後13.9秒にいたって再び配管の下端以上に回復するとともに高温側配管の流量も増加する。

高温側配管の流量が上部プレナムの水位 (Fig. 4.29 参照) にともない大きく変化するのに対してループ側破断口からの流出流量がたいした影響を受けないのは高温側配管とループ側破断口との間に蒸気発生器模擬体とポンプ模擬体という2つの大きな流動抵抗があることによっている。蒸気発生器模擬体の入口と出口における流量およびクオリティーを高温側配管とループ側破断口における値と比較してそれぞれFig. 4.24およびFig. 4.25に示す。蒸気発生器模擬体の入口の流量およびクオリティーはそれぞれ破断ループ高温側配管の流量およびクオリティーに近い傾向にある。また蒸気発生器模擬体出口における流量およびクオリティーはそれぞれループ側破断口の流量およびクオリティーに近い傾向にある。これらの傾向はいずれも蒸気発生器模擬体の流体体積が大きく、ポンプ模擬体の流動抵抗が大きいことによっている。

いっぽう圧力容器側破断口からの流出流量は破断ループ低温側配管の流量の影響をより直接

的に受ける。流出流量の絶対値は低温側配管の流量に近く、それよりやや大きい傾向にある (Fig. 4.22 参照)。ダウンカマの水位が低温側配管の上端に達するとそれに応じて圧力容器側破断口からの流出流量も小さくなる (Fig. 4.22 参照)。破断後 12.6 秒から破断ループ低温側配管の流量が小さくなり、逆に圧力容器側破断口からの流出流量が少し大きくなる傾向があるのはボリューム 25 の再冠水補助バイパスが沸騰を開始し、それとともに破断ループへの流入が始まるからである (Fig. 4.26 参照)。破断ループ高温側配管についた再冠水補助バイパスも破断後 12.4 秒から沸騰を開始し破断ループへ流入し始めるが、ポンプ模擬体の流動抵抗が大きいとためループ側破断口からの流出流量にほとんど影響を及ぼさない (Fig. 4.27 参照)。破断ループ高温側配管の流量も非常に小さくなっておりあまりこの影響を受けず、蒸気発生器模擬体入口の流量がやや大きくなっているにすぎない (Fig. 4.24 参照)。

Fig. 4.23 に示したクオリティーから以下の点が明らかである。破断ループ低温側配管および高温側配管における沸騰開始時間が破断後それぞれ 2.0 秒と 3.4 秒であるのに対して破断口では破断と同時に沸騰を開始する。圧力容器側破断口およびループ側破断口からの流れのクオリティーは破断後しばらくするとそれぞれ約 3% と 8% におちつく。圧力容器側破断口からの流出クオリティーのほうがループ側破断口からの流出クオリティーより低いと破断後約 18 秒から 33 秒の範囲では大小関係が逆転している。これは高温側配管の下端以下に下っていた上部プレナムの水位 (Fig. 4.29 参照) が配管の下端以上に回復し、破断ループ高温側配管から低クオリティーの水が流れ出たことによっている。破断ループ高温側配管の流れのクオリティーは上部プレナムの水位の影響を強く受ける。上部プレナムの水位が高温配管の上端まで低下するとクオリティーは急激に上昇し、水位が高温側配管の下端以下の 7.4 秒から 8.5 秒の時間範囲では 1 となっている。8.5 秒で水位が再び高温側配管の下端以上に回復するとクオリティーは急激に低下する。破断後約 32 秒のクオリティーのピークは上部プレナム水位の僅かな下降にともなっている。38 秒以後水位の低下にともないクオリティーは大きく上昇し、水位が高温側配管の下端以下になると再びクオリティーは 1 となる。破断ループ高温側配管の流れのクオリティーが上部プレナム水位の影響を直接大きく受けるのに対して、破断口からの流出クオリティーの変化割合は高温側配管のクオリティーの変化より小さくしかも時間遅れがある。これは上部プレナムとループ側破断口の間と比較的大きな流体体積があり、しかも蒸気発生器模擬体とポンプ模擬体による大きな流動抵抗が存在することによっている。

いっぽうダウンカマと圧力容器側破断口の間にはたいした流動抵抗は存在せず、破断口からの流出クオリティーは破断ループ低温側配管の流れのクオリティーと破断後 15 秒以後ほぼ一致している。破断後 6.8 秒におけるクオリティーの上昇もほとんど時間遅れなしに破断口に伝わっている。このクオリティーの上昇はダウンカマの水位 (Fig. 4.28 参照) が低温側配管の上端以下に低下したことによっており、水位が低温側配管の中心線より高い位置で一定に保たれたためクオリティーの上昇割合は小さくなっている。

Fig. 4.28~4.31 にダウンカマ、上部プレナム、加圧器、および健全ループ蒸気発生器の入口側ボリュームの水位の時間変化を示す。ダウンカマは破断後 2.3 秒で飽和し水位は低下を開始する。破断後 6.8 秒でダウンカマ水位は低温側配管の上端に達する。Fig. 4.28

～4.31 には各ボリュームに対して問題となる出口配管の中心線，上端，および下端の高さを併せて示した。ダウンカマの水位が低温側配管の中心線より高い位置で一定に保たれるのはダウンカマの流体体積が大きくしかも健全ループから直接大きな流入があることによっている。

上部プレナムの水位 (Fig. 4.29 参照) は破断後 3.5 秒で沸騰を開始した後急速に低下し，破断後 7.4 秒で高温側配管の上端に達する。上部プレナムの水位の上下は炉心からの流れと高温側配管の流れのバランスによってきまる (Fig. 4.37 参照)。健全ループに蒸気が発生するにつれてポンプの駆動力は急速に低下し，炉心から上部プレナムへの流れも急減する。上部プレナムの水位が高温側配管の上端に達した 7.4 秒以後破断ループ高温側配管からの流出流量は減少するが，破断後 7.8 秒に加圧器の水位 (Fig. 4.30 参照) が出口配管の上端に達し，加圧器の圧力が直接一次冷却系に伝わることによる上部プレナムから炉心への逆流の増加があり，水位は低下し続ける。そして破断後 10.3 秒から 11.6 秒までの間上部プレナムの水位はほぼ零に保たれる。加圧器の効果が小さくなるにつれて炉心への逆流は小さくなり，11.6 秒以後上部プレナムでの水の収支は正に転じその水位は上昇を開始する。13.9 秒には高温側配管の下端まで水位は回復し，15 秒以後水位はほぼ一定に保たれる。28.2 秒以後炉心へ再び逆流しはじめると水位は徐々に低下し，42.7 秒でまた高温側配管の下端以下となり以後急速に低下する。

Fig. 4.30 に加圧器の水位の時間変化を示す。

加圧器には破断前から水位があり飽和状態であり，破断と同時に水位は低下する。破断後 7.8 秒で水位は加圧器からサージラインへの流路の上端に達する。以後水位低下速度は小さくなるが少しずつ水位は低下し続ける。

Fig. 4.31 に，健全ループ蒸気発生器の入口側ボリュームにおける水位の時間変化を示す。破断後 0.6 秒で沸騰を開始し水位は低下し始める。水位が形成されると蒸気発生器入口ボリュームから出口ボリュームへの流出流量は急激に減少し，3.5 秒以後流入流量とバランスする (Fig. 4.40 参照)。流れのバランスは加圧器の効果が持続する破断後約 12 秒まで保たれる。流れのバランスに対応し水位は破断後 2.2 秒から 12.0 秒まで一定の 9.7 ft に保たれる。水位は流れのバランスよりやや早く一定となっている。加圧器の圧力が減少するにつれて蒸気発生器への流入流量は減少し破断後 13.2 秒以降では逆流する (Fig. 4.40 参照)。蒸気発生器への流入流量の減少に応じて水位は 12.0 秒以後低下し，31.6 秒で蒸気発生器入口配管の上端に達する。そして 33.8 秒以後水位はほぼ一定に保たれる。

Fig. 4.32 に，健全ループ高温側配管 (V1) および加圧器 (V22) の圧力の時間変化を示す。一次冷却系内では加圧器および破断口近傍を除き圧力の変化は小さく，健全ループ高温側配管の圧力は一次冷却系の圧力を代表していると考えることが出来る。V1 の圧力は破断後その初期値の 2272.7 psia から急速に減少し破断後 1 秒において飽和圧力に近い 925 psia におちつく。破断後 1 秒において V1 の温度は初期値の 539°F より低く 533.6°F となっており，それに対応する飽和圧力は 912.6 psia である。破断口の直前ボリュームがまず沸騰を開始して系の圧力はほぼ一定におちつき，一次冷却系の各ボリュームが沸騰を開始するのはやや時間遅れがある。V1 が沸騰を開始するのは破断後 3.0 秒においてである。おもなボリューム

ームの沸騰開始時刻を水位の動きとともに Table 4.6 に示す。一次冷却系内の圧力は破断後ほぼ一定値におちついた後徐々に低下し、加圧器の圧力が一次冷却系の圧力に近づき加圧効果がなくなる破断後 1.2 秒近傍から圧力の低下速度は速くなる。

加圧器の圧力は破断後、加圧器からの流出開始にともない初期値 2269.7 psia からほぼ直線的に低下する (Fig. 4.32 参照)。加圧器サージラインから一次冷却系配管への流れは破断後 0.2 秒で 2 相臨界流となり、流量、クオリティーともにほぼ一定となる (Fig. 4.38, 4.39 参照)。破断後 7.8 秒となり加圧器の水位がサージライン配管の上端に達するとサージラインからの流出クオリティーは急上昇して 1.0 に近づき、流量は逆に急速に小さくなる (Fig. 4.38, 4.39 参照)。加圧器からの蒸気の流出にともない加圧器の圧力は急低下し一次冷却系の圧力に近づく (Fig. 4.32 参照)。

Fig. 4.33 に、健全ループおよび破断ループの低温側配管における密度の時間変化を示す。健全ループ低温側配管の流れは常に正流であり (Fig. 4.35 参照)、その密度は流れのクオリティー (Fig. 4.36 参照) の上昇にともないなめらかに低下する。破断後 2.5 秒までは未飽和であり密度は一定に保たれる。破断直後に僅かに密度が下るのは破断にともなり圧力の急減に対応するものである (Fig. 4.33, 4.34 参照)。いっぽう破断ループ低温側配管の密度はダウンカマーの流体条件に依存し健全ループ低温側配管の密度より複雑な時間変化をする。破断後 2.3 秒におけるダウンカマーの沸騰開始にともない破断ループ低温側配管の密度は低下しはじめる。破断後 6.8 秒における密度の急減少はダウンカマーの水位が低温側配管の上端に達したことに対応している (Fig. 4.28 参照)。

Fig. 4.34 に健全ループおよび破断ループの高温側配管における密度の時間変化を示す。健全ループ高温側配管においては破断後 3.0 秒で沸騰を開始しその密度は低下しはじめる。破断後 3.5 秒で健全ループ高温側配管における流れは逆流となり、それにともないその密度は急速に減少する。破断後 7.8 秒で加圧器の水位が出口配管の上端に達し加圧器の蒸気が一次冷却系に流入するにょんで再度健全ループ高温側配管の密度は急速に減少する。破断後 1.8 秒および 2.8 秒近傍における密度の一時的な増加は低クオリティーの逆流流量の増加に対応しており、これは破断後 1.2 秒以後加圧器の加圧効果がなくなり蒸気発生器から上部プレナム方向への逆流が増加したことによっている (Fig. 4.35, 4.38, 4.40 参照)。

いっぽう破断ループ高温側配管における流れは常に正流であり (Fig. 4.35 参照)、その密度は破断後 3.5 秒における上部プレナムの沸騰開始にともない低下しはじめる。そして上部プレナムの水位が破断後 7.4 秒に高温側配管の上端に達すると蒸気が流出するようになり、破断ループ高温側配管における流体密度はさらに急速に低下する。上部プレナムの水位が低下し続け高温側配管の下端以下になると密度は蒸気の密度に近づく。破断後 12.4 秒における再冠水補助バイパスの沸騰開始および 13.9 秒における上部プレナム水位の高温側配管の下端以上への回復にともない破断ループ高温側配管における密度は一時的に大きくなる。破断後 15 秒以後上部プレナムの水位は再び徐々に低下し、それに応じて破断ループ高温側配管における密度も徐々に低下する。

Fig. 4.35, 4.36 に、圧力容器に接続している配管におけるそれぞれ流量およびクオリティーを示す。



破断ループの低温側配管および高温側配管における流れの方向は当然のことながら常に压力容器から流出する方向である。したがって破断ループ低温側配管および高温側配管における流れのクオリティはそれぞれダウンカマールおよび上部プレナムの水位の動きの影響を直接的に受けている。健全ループ低温側配管からダウンカマールへの流れは常に正方向である。これは破断口による減圧効果とポンプによる加圧効果によっていると考えられる。流れのクオリティも健全ループ内のクオリティの上昇とともにスムーズに上昇する。健全ループの高温側配管における流れは破断後しばらくは健全ループ低温側配管から炉心を通しての流入効果により正流に保たれる。低温側配管からの流入流量の減少および加圧器の効果により破断後3.5秒には健全ループ高温側配管における流れは逆流となり以後逆流のままに保たれる。流れが逆流になるに従い流れのクオリティは上昇を開始する。破断後7.8秒で加圧器の水位が出口配管の上端に達し蒸気が一次冷却系へ流入するようになるにつれて健全ループ高温側配管のクオリティは大きく上昇し1に近づく。健全ループ高温側配管のクオリティの時間変化は破断ループ高温側配管のクオリティと似た傾向にある。これは健全ループ高温側配管から上部プレナムへの逆流が破断ループ高温側配管から流出しそのクオリティに大きな影響を及ぼしていることを示している。破断後3.5秒以後は健全ループの低温側と高温側の両配管から压力容器に流入し、破断ループの両配管から流出している。压力容器への流入流量は流出流量より常に小さく、压力容器内の水の量は徐々に減少していく。

Fig. 4.37 に、上部プレナムに接続している配管の流量を示す。これらの流量のバランスにより上部プレナムの水位は直接的影響を受ける。破断ループ高温側配管からは当然常に流出している。炉心から上部プレナムへの流れは大体正流であるが5秒から11秒の間は逆流となり上部プレナムから流出している。健全ループ低温側配管から压力容器への流入に破断ループ低温側配管からの流出効果が重なり炉心から上部プレナムへの流れは逆流に転ずる。破断後4.6秒において逆流への傾向が弱まるのは炉心での沸騰開始によっている。破断後7.8秒後に逆流が一時的に強くなりその後徐々に逆流が小さくなり正流に転ずるのが加圧器の効果におもによっていることはすでに上部プレナムの水位の議論に関して見たとおりである。上部プレナムから健全ループ高温側配管への流れは破断後3.5秒まで正流であり、以後逆流となり上部プレナムへ流入する。破断後4秒近傍までは炉心からの流れとほぼ同傾向の流れの時間変化を示しそれに破断ループ高温側配管からの流出および加圧器からの流入の効果が重なっている。破断後4.6秒に炉心が沸騰を開始するとその圧力が上部プレナムに伝わり健全ループ高温側配管から炉心への流入は小さくなる。破断後7.8秒で加圧器の水位が出口配管の上端に達し蒸気が流出するようになると加圧器の圧力が直接一次冷却系に伝わり健全ループ高温側配管から上部プレナムへの逆流は一時的に強まり、その後加圧器の圧力急減とともに逆流は徐々に小さくなる。この加圧器による7.8秒以後の流量に対する影響が健全ループ高温側配管より炉心から上部プレナムへの流れの方に顕著にあらわれるのはクオリティの差によっている。破断後7.8秒以後、加圧器からの蒸気流により健全ループ高温側配管におけるクオリティが急上昇するのに対して、炉心への逆流のクオリティは低いままに保たれる。これは炉心への流出口が上部プレナムの下端で水面下にあることによっている。

Fig. 4.38 に、加圧器サージラインから一次冷却系への流れ、および流れ込んだ一次冷却

系配管における流れの時間変化を示す。加圧器の水位がその出口配管の上端に達する破断後 7.8 秒までサージラインの出口流量はほぼ一定に保たれ、以後急激に低下する。破断後 15 秒には流量はほとんど零となり加圧器の効果はなくなる。破断後 3.5 秒近傍までは健全ループ低温側配管の流れの傾向が強く残っており、加圧器からの流れはすべて蒸気発生器の方へ流れる。破断後約 4 秒以後サージラインに接する一次冷却系配管の流れはおもにサージラインからの流れに支配され、蒸気発生器側へは正流、上部プレナム側へは逆流となっている。また Fig. 4.39 にサージライン出口におけるクオリティーを示す。破断後 2 相臨界流となりほぼ一定に保たれたクオリティーが、加圧器水位がその出口配管の上端まで低下するにおよんで再び急上昇し 1 に近づくことが分る。

Fig. 4.40 に、健全ループの蒸気発生器入口ボリュームにおける流れのバランスを示す。破断後 0.6 秒に沸騰を開始するまでは流入と流出の流れのバランスは保たれている。沸騰開始とともにその効果によりボリュームの出口における流れは一時的に増加し、水位の形成とともに流量は急激に減少する。ボリュームの入口における流量は沸騰開始によりいきなり急低下し、1.6 秒以後一時的に増加する。これは高温側配管からの流れと加圧器からの流れの効果によっている。破断後 3 秒近傍には健全ループ低温側配管における流れの傾向がまだかなり残っている。ボリューム出口の流れは蒸気流でありこの傾向はほとんど残っていない。破断後 3.4 秒から 12.3 秒の間は流れはバランスしており水位も一定に保たれる (Fig. 4.31 参照)。13.1 秒以後ボリューム入口の流れが逆流するのに対してボリューム出口の流れはほとんど零となるものゝ正流のまま保たれる。蒸気発生器は大きな高さがあり、その最高点が分水嶺となっていることがよく分る。

Fig. 4.41 には健全ループの蒸気発生器最高点から低温側配管までの流れが示されている。流れはいずれも常に正流であり、低温側配管に近づくにつれて流量は大きくなっている。またポンプを通過した後の流れはほぼ一定でありバランスしている。Fig. 4.42 は蒸気発生器出口ボリューム、ポンプ、および低温側配管におけるクオリティーが示されている。破断後 2.5 秒までにいずれも飽和に達し、以後スムーズにクオリティーは上昇し破断後約 40 秒でほぼ一定となり 0.8 前後の値におちつく。ポンプの加圧効果により低温側配管に近づくにつれてクオリティーは少しずつ低くなっている。

Fig. 4.43 に、健全ループ低温側配管、およびダウンカマーから下部プレナムへの流れの時間変化を示す。両者の差が破断ループ低温側配管からの流出流量にほぼ対応する。健全ループ低温側配管における流量は破断後しばらく破断口からの吸出し効果により定格値の 586.1 lb/sec より大きい値となっている。その後ボイドの発生およびポンプの加圧効果の低下とともに流量は急速に小さくなる。ダウンカマーから下部プレナムへの流量は破断後 4.2 秒まで健全ループ低温側配管からの流入流量と似た傾向である。ただし破断ループ低温側配管からの流出流量に対応する値だけ小さくなっている。破断後 4.2 秒以後ダウンカマーから下部プレナムへの流れは逆流となる。これは健全ループ低温側ループからの流入量が破断口からの流出量より小さくなったことに対応している。破断後 4.5 秒から逆流流量の増加割合がにぶるのは下部プレナムの沸騰開始により流動抵抗が増加したことによっていると考えられる。

Fig. 4.44 にはダウンカマーから下部プレナム、下部プレナムから炉心、および炉心から

上部プレナムへの流量を比較して示す。いずれもよく似た傾向の時間変化をしている。特に破断後 3.8 秒までは流量は完全に一致しており流れがバランスしていることが分る。これは健全ループ低温側配管からの流入流量が充分大きく、健全ループ高温側配管、破断ループの低温側配管、および破断ループ高温側配管の流量を供給していることによっている。破断後 4.5 秒、4.6 秒における下部プレナムと炉心の沸騰開始の効果は 3 つの流れに共通してあらわれている。破断後 7.8 秒から 15 秒までにかけての加圧器の効果も 3 つの流れに共通して同傾向にあらわれている。ただし加圧器に近い程その効果は顕著であり、炉心から上部プレナムへの流れに最も大きくあらわれている。破断後 11.4 秒から 28.5 秒まで炉心から上部プレナムへの流れは正流に回復するが、他の 2 つの流れは破断後約 4.5 秒で逆流になった以後逆流のままである。Fig. 4.45 にはダウンカマー、下部プレナム、炉心、および上部プレナムのクオリティーを示す。ただしダウンカマーと上部プレナムのクオリティーは水位より下の水のクオリティーである。上部プレナムにおいて水位が配管の下端以下に大きく低下することに対応して大きなクオリティーの上昇がある以外はいずれも 20% 以下の低いクオリティーに保たれている。下部プレナムと炉心のクオリティーは破断後 29.1 秒まではほぼ一致しており、以後炉心のクオリティーの方が低くなるのは上部プレナムから炉心への逆流開始によっている。

Fig. 4.46 にはサブプレッションタンクの圧力の時間変化が示されている。破断後 30 psia からほぼ一定割合で上昇し、破断口からの流れの減少にともない圧力の上昇速度もにぶり破断後 45 秒で約 42 psia におちつく。サブプレッションタンクの体積は充分大きくその圧力上昇はわずかに約 12 psi におさえられている。

#### 4.9 実験結果と解析結果の比較検討

4.2 節から 4.7 節において圧力を中心とし、一部の実験データと解析結果の比較が既にある程度行われている。本節においては 4.8 節で調べたケース(18)の計算結果とより広い範囲の測定結果との比較検討を行う。

Fig. 4.47~Fig. 4.55 には、それぞれ健全ループの高温側配管、ポンプ入口ボリューム、低温側配管、加圧器、および破断ループの高温側配管、ポンプ模擬体入口ボリューム、低温側配管、低温側配管破断口ノズル、サブプレッションタンクにおける圧力の時間変化を実験結果と比較して示す。計算結果は円形の点を付した実線で表わされ、実験結果は方形の点を付した実線で表わされている。実験結果はゲージ圧で表わされており、絶体圧の計算結果とは約 12.8 psi の差がある点に注意する必要がある。

加圧器およびサブプレッションタンクをのぞき圧力の計算結果はいずれも実験結果とよく一致している。ただし計算結果では 12 秒近傍から圧力の低下速度がはやまっているのに対して実験結果ではそれが破断後約 15 秒となっている。両者の差は加圧器の圧力の矛盾によっている。圧力の低下速度が大きくなるのは加圧器の圧力が一次冷却系の圧力に近づき加圧効果がなくなった点に対応する。

加圧器の圧力の実験結果 (Fig. 4.50 参照) が破断直後約 2050 psia まで急低下するのは、加圧器の電気ヒータより下の部分に未飽和水が存在しそれが破断とともに急激にヒータより上の飽和の部分と混合するためであると考えられる。加圧器の圧力が一次冷却系の圧力に近

くなる以前における圧力低下速度は破断直後を除き計算結果の方が実験結果より常に大きい。また加圧器の水位が出口配管の上端に達しその圧力が急低下しはじめる時間も計算結果の方が実験結果より早い。これらはいずれも計算で仮定した加圧器サージラインの流動抵抗係数が小さくその流出流量が大きかったことによる。常識的に考えうる流動抵抗はすべて解析上考慮されており、この矛盾点についてはさらに今後検討する必要がある。

サブプレッションタンクの圧力 (Fig. 4.55 参照) の計算結果と実験結果との間にはかなりその傾向に差がある。計算結果が時間とともに単調に上昇し、その上昇速度が徐々に遅くなるのに対して、実験結果は破断直後急激に上昇し、一時的に低下した後再び上昇している。これは破断前にサブプレッションタンクヘッダ及びダウンカマ内に空気が存在すること、破断にもなり2相流の急激な流入による衝撃などによっていると考えられる。しかしサブプレッションタンクの体積は充分大きくその圧力上昇は 40 psi 以下に低くおさえられている。したがってブローダウンにおいて問題となる時間範囲では一時冷却系の圧力はサブプレッションタンクの圧力より充分高く、サブプレッションタンクの圧力の計算値と実験値との矛盾が一次冷却系内の流体条件に与える影響は比較的小さいと考えられる。

Fig. 4.47 の健全ループ高温側配管における圧力の時間変化には INEL において行われた L1-2 実験の予備解析<sup>(13)</sup>の結果も併せて示した。INEL の予備解析と比較して今回の解析が実験結果と格段によく一致していることが分る。両解析のおもな入力データの差はボリュームの切り方、熱源構造体を考慮した位置、水位を考慮したボリューム、炉心バイパスの考慮の有無、蒸気発生器の2次系の考慮の有無などに存在する。INEL の解析においてはボリューム数は 52 と今回の解析における 28 の約倍近くあり、炉心バイパス、蒸気発生器の2次系なども当然考慮されている。しかし重要な機器でのボリューム分割さえ忘れなければボリュームの切り方の精粗が解析結果にそれ程大きな影響を及ぼすとは考えられない。蒸気発生器の2次系もブローダウン過程においてはそれ程重要でないということが ROSA-II 実験<sup>(18)</sup>からも分っている。炉心バイパスの考慮の有無のみからは INEL と今回の解析結果の大きな差を説明できないことは 4.5 節の解析結果から明らかである。INEL の解析においては熱源構造体は一次冷却系のほとんどすべてのボリュームに考慮されているが、今回の解析において考慮されたのはダウンカマのみである。しかしダウンカマ以外の熱源構造体が系の圧力の解析結果に及ぼす影響が小さいことは 4.6 節の検討結果から明らかである。したがって INEL と今回の解析の差はおもに水位を考慮したボリュームのちがいでっていると推定される。INEL の解析で水位が考慮されてなくて今回の解析で水位を考慮してあるのは健全ループ蒸気発生器の入口側ボリュームであり、これが両解析の差のおもな原因となっていると考えられる。事実、蒸気発生器の入口ボリュームに水位を仮定した INEL の L1-3A 実験の解析においては圧力の解析結果は ECCS 作動前において実験結果とよく一致している。ECCS 作動前は L1-2 と L1-3A の両実験の間に大きな差はない。破断ループの蒸気発生器模擬体およびポンプ模擬体の形状損失係数が解析結果に大きな影響を及ぼすことは 4.2 節の検討で分っており、当初 INEL と今回の解析結果の差はこの形状損失係数の差によっていると考えた。しかし両解析における形状損失係数の差は小さいことが明らかとなった。流路面積  $0.09 \text{ ft}^2$  に対して換算した蒸気発生器模擬体およびポンプ模擬体の形状損失係数の和、すなわち 4.2 節

で定義した総合形状損失係数 $K_f$  (Sim.) の今回の解析における値が 2.1.1 であるのに対して INEL の解析における値は 1.6.5 となっている。

Fig. 4.56~Fig. 4.60 に健全ループ高温側配管, 健全ループ低温側配管, 破断ループ高温側配管, 破断ループ低温側配管, および加圧器における流体温度を示す。加圧器の流体温度の計算結果は三角形の点を付した曲線で示されており, 他の場所における計算結果は円形の点を付した曲線で示されている。

加圧器を除くボリュームにおける流体温度が実験値, 計算値ともに破断直後約 5°F 急低下するのは急激な断熱減圧によっている。時刻零および破断後 0.2 秒において健全ループ高温側配管における圧力および温度の計算値はそれぞれ

$$\begin{aligned} t=0.0 \text{ sec} \quad , \quad P &= 2272.7 \text{ psia} \quad , \quad T = 539.0^\circ\text{F} \\ & \quad (159.8 \text{ ata}) \quad \quad (281.7^\circ\text{C}) \\ t=0.2 \text{ sec} \quad , \quad P &= 952.1 \text{ psia} \quad , \quad T = 533.5^\circ\text{F} \\ & \quad (66.94 \text{ ata}) \quad \quad (278.6^\circ\text{C}) \end{aligned}$$

と求められており。両時刻における比エントロピーはいずれも  $0.7295 \text{ kcal/kg}^\circ\text{K}$  と完全に一致し, 破断直後の急激な減圧は等エントロピー変化であることが認められている。破断直後の温度の計算結果が実験結果と非常によく一致しているのに対し, 圧力 (Fig. 4.47~ Fig. 4.54 参照) の計算結果は実験結果より約 40 psi 高くなっているが, これはおもに圧力測定 of 誤差によると考えられる。破断直後の圧力の測定誤差<sup>[11]</sup>としては  $\pm 50 \text{ psi}$  という値が与えられており, 測定誤差の範囲内では計算結果は実験結果と一致している。

破断後 4 秒以内に Fig. 4.56 ~ Fig. 4.59 に示した各ボリュームは飽和し, 以後 30 秒近傍まで流体温度は圧力に対応する飽和温度を示している。とくに健全ループ高温側配管においては計算値, 実験値ともに全ブローダウン過程をとりして飽和条件が満たされている (Fig. 4.56 参照)。破断後 4 秒以後しだいに計算値と実験値の差が大きくなるのはサブプレッションタンクの平衡圧力の差によっている。サブプレッションタンクの平衡圧力の計算値および実験値はそれぞれ 42 psia および 65 psia であり, その飽和温度はそれぞれ  $270^\circ\text{F}$  および  $289^\circ\text{F}$  となり  $20^\circ\text{F}$  近い差がある。健全ループ高温側配管以外のボリュームにおいては破断後 30 秒前後に飽和条件からの離脱がみられ, これはおもに流量の減少によっている。流量が非常に小さくなりそのクオリティーが上昇すると熱電対と流体の温度差が大きくなることが考えられる。流体自身の熱源構造体による加熱も当然あるが高クオリティーのためその熱伝達率は比較的小さいと考えられる。いっぽう管壁に近く設置された熱電対は放射および熱伝導により熱源構造体からの加熱をより大きく受けると考えられる。流量が小さい程飽和条件からの離脱は早い。破断後 30 秒近傍においては流量は破断ループ低温側配管, 破断ループ高温側配管, 健全ループ低温側ループの順に小さくなり (Fig. 4.35 参照), 飽和条件からの離脱もこの順序にそれぞれ 4.3.8 秒, 3.4.1 秒, 2.7.7 秒と早くなる。破断ループ低温側配管においては健全ループ高温側配管の流量より大きいにもかかわらず飽和条件からはやく離脱するのは, 大きな熱源構造体をもったダウンカマールから直接過熱蒸気が流入する効果によっていると考えられる。水位の存在するボリュームにおける熱源構造体の, 現在の RELAP-4 J コードによる取扱法はまだ不完全なものである。

Fig. 4.60 に、加圧器内流体の温度変化を示す 2つの点における測定結果はいずれも計算結果と大きくずれている。加圧器の中は常に飽和条件であり、温度の計算結果が圧力の計算結果と同傾向の時間変化を示し飽和条件を示しているのに対し、温度の実験結果は過熱状態を示している。したがって実験結果の方が明らかに誤っている。加圧器内の熱電対は大きなケースに納められているため、その時定数が大きいばかりでなく加圧器壁により熱伝導をとり大きな加熱を受ける。熱電対の時定数が大きいことは他の場所における温度の測定結果が微小振動を繰返しながら変化しているのに対し、加圧器内の熱電対による温度の測定結果が非常に滑らかな時間変化をしていることから明らかである。Fig. 4.60 における TEFTD 205 の測定値は上記の時定数および壁による加熱の効果で説明することが出来る。また TEFTD 204 の測定結果が破断後 24 秒以後一定となるのは熱電対が断線したことによっていると考えられる。

Fig. 4.61 には破断ループの蒸気発生器模擬体およびポンプ模擬体の前後における差圧を示す。蒸気発生器およびポンプの模擬体の前後のボリューム間の差圧の計算結果は実験結果とほぼ満足すべき精度で一致している。このことは蒸気発生器模擬体およびポンプ模擬体の形状損失係数が正しく与えられていることを示している。また Fig. 4.61 から蒸気発生器模擬体における圧力損失がポンプ模擬体における圧力損失の約  $1/10$  以下と小さく、破断ループ高温側配管とその破断口との間の圧力損失はおもにポンプ模擬体によるものであることが分る。またポンプ模擬体に対応するジャンクションのみによる圧力損失は実験結果と比較して小さく、ポンプ模擬体前後のボリュームにおける差圧計の測定結果は実際の差圧の測圧位置にそくしボリューム間の差圧の計算結果と比較すべきであることが明らかである。

Fig. 4.62 には加圧器の水位の測定結果と解析結果を比較して示す。円周方向に 3 点で求めた実験結果相互はほぼよく一致している。しかし実験結果は差圧の測定結果から求めた値であり、水面下のクオリティーをどう考慮しているか不明である。加圧器水位の計算結果の初期値は実験結果より大きく、水位低下速度も実験結果より大幅に大きくなっている。L1-3A 実験<sup>[17]</sup>における水位の初期値に L1-2 との初期水量<sup>[11]</sup>の差を補正すると今回の計算値に近い値となる。また L1-2 の加圧器の水位と圧力の測定結果の間に矛盾があることもすでに 4.7 節で述べた。最近の情報<sup>[19]</sup>により L1-2 は差圧から水位を求めるテーブルに誤りがあったことが判明した。

Fig. 4.63~Fig. 4.67 には健全ループの高温側配管、ポンプ入口、低温側配管および破断ループの高温側配管、低温側配管における密度の時間変化を示す。密度の測定は  $^{137}\text{Cs}$  からの  $662\text{keV}$  の  $\gamma$  線源を使いその配管中での  $\gamma$  線減衰率から求めている。 $\gamma$  線は配管の断面上の 3つの方向に照射しそれぞれの密度を求めている。方形、円形、三角形の点を付した実験結果はそれぞれ Fig. 4.68 における A, B, C の 3 方向に対応している。ポンプ入口以外の場所においては下から A, B, C の 3つの方向に照射されており、ポンプ入口に対応する蒸気発生器の出口配管は垂直であるため 3つの方向は水平面上に A, B, C の順となっている。

高温側配管における密度は 3つの方向に対する測定結果の間の差が大きく、流動パターンが複雑に変化していることが推測される。いっぽう低温側配管およびポンプ入口における密度の測定結果には方向依存性が小さく、かなり均質に近い流れであることが推測される。解析上は

配管における流れは完全な均質流と仮定されている。したがって、均質に近い流れであると推定される低温側配管およびポンプ入口においては計算結果と測定結果はほぼ満足すべき一致をえている。とくに破断ループ低温側配管における一致はよい。これは破断ループ低温側配管においては長い時間範囲にわたって高流量が保たれ (Fig. 4.35 参照), 均質流の仮定がよく成り立っているためであると考えられる。健全ループのポンプ入口および低温側配管においては破断後 4 秒近傍から流量が急低下し (Fig. 4.41 参照), それにともない密度の計算結果と実験結果のずれがやゝ目立つようになる。これは流量の低下にともない均質流の仮定がやゝくずれてきたためであると考えられる。とくに健全ループ低温側配管においては破断後 7 秒近傍から密度の測定結果に方向依存性があらわれ, その時間的な変動の振幅も大きくなる (Fig. 4.65 参照)。

高温側配管においては測定結果の方向依存性が大きく, 均質流を仮定した計算により測定結果を完全に説明することが不可能なことは明らかである。とくに破断ループ高温側配管においては破断後約 3 秒における沸騰開始とともに測定結果は大きな方向依存性をもつ (Fig. 4.66 参照)。A, B 方向の測定結果がほぼ一致しているのに対し C 方向の密度のみ急低下するのは配管の上部にボイドが集まった stratified flow になっているためと推測される。健全ループ高温側配管において破断後 5.5 秒から密度が急低下するのは流れの方向が正流から逆流へと逆転するためと推定され, 密度の測定結果の方向依存性が大きくなるのはおもに破断後 10 秒以後においてである (Fig. 4.63 参照)。均質流を仮定した計算によって 3 つの方向の実験結果をすべて説明することが不可能なのは当然であるが, 計算結果は 3 方向の測定結果の範囲内にほぼ納まり, 3 方向の測定結果の定性的傾向をかなりよく表わしている。健全ループ高温側配管の破断後 5.5 秒における逆流による密度の急低下は, タイミングは約 2 秒はやいものの計算結果にもよく表われている。また破断後 2.2, 3.3 秒における A 方向の密度の高まりもタイミングはややずれているものの計算結果にもよく表われている。破断ループ高温側配管の C 方向の密度は沸騰開始とともに急低下するが計算結果も沸騰開始とともに密度は低下し始める。破断後 7.4 秒に上部プレナムの水位は高温側配管の上端に達し, それにともない密度の計算結果は急低下する。B 方向, A 方向の密度の測定結果も順次水位の低下にともない急低下している。また一度下端まで低下した上部プレナムの水位が上昇を開始し破断後 13.9 秒に高温側配管の下端まで回復するにともない密度の計算結果も上昇を開始し 16 秒近傍にピークをなす。この傾向も A 方向, B 方向の測定結果によく表われている。破断後 25 秒近傍における A 方向の密度の上昇は計算結果にはピークの形では表われていないが B, C 方向の測定結果より密度が高く保たれているという形で表われている。A 方向の密度が低下するにともない計算結果も小さくなり零に近づく。これは破断ループ高温側配管からの流出流量の低下に対応している。

Fig. 4.69~Fig. 4.73 には健全ループの高温側配管, ポンプ入口と低温側配管, および破断ループの高温側配管と低温側配管における平均密度の時間変化を示す。実験結果は 3 つの方向に対して測定した密度を流れの種類に応じた重みを使い, 平均したものである。計算結果は方形の点を付した曲線で示されている。平均密度に関しても, 3 方向の密度と計算結果との比較においてすでに述べたのと同傾向であり, 破断ループ低温側配管においては流量が大きい

く均質流の仮定がよく成り立つため密度の計算結果は実験結果とよく一致している。健全ループ低温側配管およびポンプ入口においても破断後約7秒近傍までは流量が大きく密度の計算結果は実験結果とよく一致する。しかし7秒以後流量が低下するにつれ均質流の仮定はくずれ計算結果と実験結果のずれはやゝ大きくなる。健全ループおよび破断ループの高温側配管においては低温側配管と比較して流量低下がはやく密度の計算結果の実験結果とのずれも低温側配管における結果と比較して大きくなっている。とくに破断ループ高温側配管においては測定方向により密度は大きく異なり (Fig. 4.72 参照), 重みのとり方によりその平均値は大きく異なり, 平均化にも問題があることが明らかである。

Fig. 4.74~Fig. 4.78 には健全ループの高温側配管, ポンプ入口と低温側配管, および破断ループの高温側配管と低温側配管におけるクオリティの時間変化を示す。健全ループ低温側配管およびポンプ入口におけるクオリティの時間変化は実験結果とほぼ同傾向である。ただし計算結果がクオリティ0.8に漸近するのに対して実験結果のクオリティの上昇は急であり破断後18秒から20秒にかけて1.0となる。計算結果と実験結果の不一致の原因としては熱源構造体による加熱がおもに考えられる。計算上は熱源構造体を考慮しなかったが流量が小さくなるにつれて (Fig. 4.41 参照) 熱源構造体による加熱の寄与が大きくなると考えられる。破断ループ低温側配管におけるクオリティは破断後20秒まで実験結果と非常によく一致している (Fig. 4.78 参照)。20秒以後クオリティの実験結果が上昇しつづけて破断後28秒に1.0になるのに対して計算結果は0.2~0.4の範囲にとどまっている。破断ループ低温側配管における密度 (Fig. 4.67, 4.73 参照) の計算結果は実験結果とよく一致しているが, 破断後20秒以後密度の絶対値が小さくなるにつれて両者の差の相対割合は増大し, それがクオリティの大きな差となってあらわれたと考えられる。クオリティの高い領域ではクオリティおよび平均密度を求めるもととなる $\gamma$ 線密度計の測定精度が悪くなる点にも注意する必要がある。健全ループ高温側配管のクオリティの計算結果は破断後12秒および22秒にピークをもち以後次第に大きくなる。実験結果にも同様の傾向があるが実験結果の方が全般的にクオリティは高い。破断ループ高温側配管におけるクオリティも健全ループ高温側配管におけるクオリティと似た傾向である。ただし破断後20秒以前には健全ループよりクオリティは低い傾向にあり, 20秒以後は遂に高くなる傾向にある。これは上部プレナムにおける水位の動きと関係している。上部プレナムの水位の計算結果 (Fig. 4.29 参照) は破断後8.4秒から13.7秒にかけて高温側配管の下端以下となり, そのため破断ループ高温側配管のクオリティは健全ループ高温側配管における逆流のクオリティが反映し12秒近傍にピークをもつ。しかし測定結果のピークは20秒近傍にあり, 上部プレナムの水位の高温側配管の下端以下への低下および回復が計算結果より遅いことを暗示している。

Fig. 4.79~Fig. 4.81 には破断ループ低温側配管, 破断ループ高温側配管, および加圧器サージラインにおける流量を系の体積 ( $273 \text{ ft}^3$ ) で基格化して示す。破断ループ配管における流量の実験結果は密度とモーメントフラックスまたは差圧の測定結果を組み合わせで求めたものである。加圧器サージラインの流量の実験結果は加圧器の水位の時間変化から求めたものである。破断ループ低温側配管における流量の計算結果の時間変化は実験結果と近い傾向にある。破断後2.4秒近傍までの計算結果は実験結果よりかなり小さい。しかし, この時間範



囲においては実験結果相互の差も大きい。破断ループ高温側配管における流量は上部プレナムの水位の上下動に対応すると考えられる増減がある。ただし計算値と実験値との間にはタイミングのずれがあり、30秒以前の流量の時間変化はかなり大きくくいちがっている。流量の計算値は破断後上部プレナムの水位が高温側配管の上端に達する8.4秒以後急激に低下する。いっぽう破断ループ高温側配管における流量の実験結果は破断後10秒近傍から急低下する。したがって実際に上部プレナムの水位が高温側配管に達したのも破断後10秒近傍でないかと考えられる。密度およびクオリティーの実験結果もこの点を支持している。密度 (Fig. 4.72 参照) は破断後11秒近傍から急低下し、逆にクオリティー (Fig. 4.77 参照) は上昇を開始する。加圧器サージラインにおける流量の計算結果と実験結果とのずれは加圧器水位の計算結果と実験結果の矛盾から説明可能である。加圧器の水位の計算結果が出口配管の上端に達するのは破断後約8秒である (Fig. 4.62 参照)。いっぽう実験結果では約13秒となっている。したがって破断後約8秒までは加圧器サージラインの流量は計算値の方が大きく、それ以後は実験値の方が大きくなっている。ただしL1-2実験における加圧器水位の測定にはミスがあり、それをもとにした加圧器サージラインの流量の実験結果も参考データ程度の意味しかない点に注意すべきである。

Table 4.1 Parametric Analysis of LOFT (L1-2)

Case No.	Reference Case No.	Difference and Comment
1	1	$K_f(\text{Sim.})^*=2.4$
2	1	$K_f(\text{Sim.}) =9.0$
3	1	$K_f(\text{Sim.}) =90.1$ , Blowdown Loop Temp. Correction
4	1	$K_f(\text{Sim.}) =70.9$ , Press. and Temp. Correction, $C_D$ Correlation
5	4	Mixture Level in Upper Plenum
6	5	$K_f(\text{Sim.}) =30.1$
7	5	$K_f(\text{Sim.}) =23.3$
8	5	$K_f(\text{Sim.}) =20.1$
9	8	Pump Data
10	9	Bingham Pump Company Pump
11	9	Westinghouse Electric Corporation Pump
12	9	Noding revised, Heat Slab in Downcomer
13	12	Mixture Level in Downcomer
14	12	No Heat Slab in Downcomer
15	13	Heat Slabs for 21 Volumes
16	13	2 Volumes for Pressurizer (P.R.) Surge Line
17	16	$K_f=0.9$ for Elbows of PR Surge Line
18	17	P.R. and Its Surge Line Data
19	18	$C_x = 0.0$ , $V_B = \text{Wilson}$ in P.R.
20	19	Heat Slab in P.R. , $P_0(\text{P.R.}) = 2120$ psia
21	19	Heat Slab in P.R., $C_D$ (Surge Line Outlet) = 0.47
22	19	Heat Slab in P.R., $C_D$ (Surge Line Outlet) = 0.38
23	19	Nozzle in Blowdown Loop Treated as Junction

\*) Equivalent form-loss coefficient for S.G. simulator and pump simulator for the junction flow area of 0.09 ft<sup>2</sup>.

Table 4.2 Operating Loop Pressure at Cold Leg  
with Different Pump Data

Time (sec)	Pressure at Operating Loop Cold Leg (psia)			
	Case 8	Case 9	Case 10	Case 11
0	2281.7	2281.7	2281.7	2281.7
1	927.3	927.1	927.3	926.4
2	919.9	919.4	919.6	919.0
4	903.4	903.5	903.6	902.5
6	894.0	894.0	893.7	893.9
8	880.8	880.7	880.6	880.7
10	866.9	866.9	866.8	867.0
12	838.1	838.1	837.6	838.0
14	793.4	793.4	792.4	792.5
16	740.5	740.4	739.8	739.5
18	684.4	684.5	683.6	683.2
20	625.3	625.7	624.7	624.3
22	563.1	563.9	563.6	563.5
24	497.9	499.0	500.3	500.8
26	431.1	432.4	435.6	435.6
28	364.8	365.8	368.4	368.8
30	301.6	302.1	304.4	304.8
32	243.8	243.7	246.5	245.8
34	192.1			
36	150.0			
38	116.3			
40	90.2			
42	69.5			
44	54.0			

Case 8 : Pump Data

Case 9 : Standard

Case 10 : Pump Characteristic Curves (Bingham Pump)

Case 11 : Pump characteristic Curves (Westinghouse Pump)

Table 4.3 Flow Rate at Operating Loop Cold Leg  
with Different Pump Data

Time (sec)	Flow Rate at Operating Loop Cold Leg (lb/sec)			
	Case 8	Case 9	Case 10	Case 11
0	588.9	588.9	588.9	588.9
0.5	658.8	662.0	664.5	631.0
1	619.2	614.4	617.6	606.2
2	695.8	686.7	689.0	679.2
3	588.3	572.1	590.8	665.0
4	331.3	320.2	303.8	262.6
5	237.2	234.6	207.6	221.6
6	204.4	200.7	195.6	239.7
7	170.8	166.0	166.4	160.3
9.5	108.6	103.7	112.0	109.8
12	60.44	57.93	76.73	78.96
14.5	45.53	46.02	52.12	53.72
17	42.48	41.61	41.63	41.12
20.0	37.98	38.58	34.44	33.36
22.5	34.78	35.14	31.45	30.43
25	27.92	28.60	26.68	26.91
27.5	21.39	22.07	19.95	20.87
30	15.71	16.46	14.54	15.17
32	12.15	12.14	11.34	9.497
34.5	7.496			
37	5.329			
39.5	3.223			
42	2.087			
44	1.733			

Table 4.4 Flow Rate at Core Inlet  
with Different Pump Data

Time (sec)	Flow Rate at Core Inlet (lb/sec)			
	Case 8	Case 9	Case 10	Case 11
0	560.0	560.0	560.0	560.0
0.5	238.8	244.1	243.7	227.5
1	216.2	211.6	214.6	204.3
2	294.5	286.0	288.2	279.2
3	327.8	323.0	321.5	284.4
4	-17.35	5.751	-110.0	-121.7
5	-28.46	-30.06	-22.28	152.9
6	-45.12	-52.06	-52.14	-69.02
7	-71.14	-77.93	-82.05	-88.64
9.5	-165.8	-175.3	-155.6	-158.3
12	-103.3	-104.9	-70.44	-64.30
14.5	-47.78	-44.25	-47.49	-40.44
17	-68.06	-68.82	-75.75	-76.05
20	-76.27	-76.36	-87.30	-90.06
22.5	-69.10	-69.88	-77.16	-79.92
25	-58.31	-57.41	-74.93	-117.3
27.5	-43.09	-42.32	-76.57	-25.08
30	-28.79	-27.77	-36.11	-38.33
32	-42.65	2.656	-29.20	-13.62
34.5	8.837			
37	-19.61			
39.5	6.233			
42	-15.28			
44	-18.98			

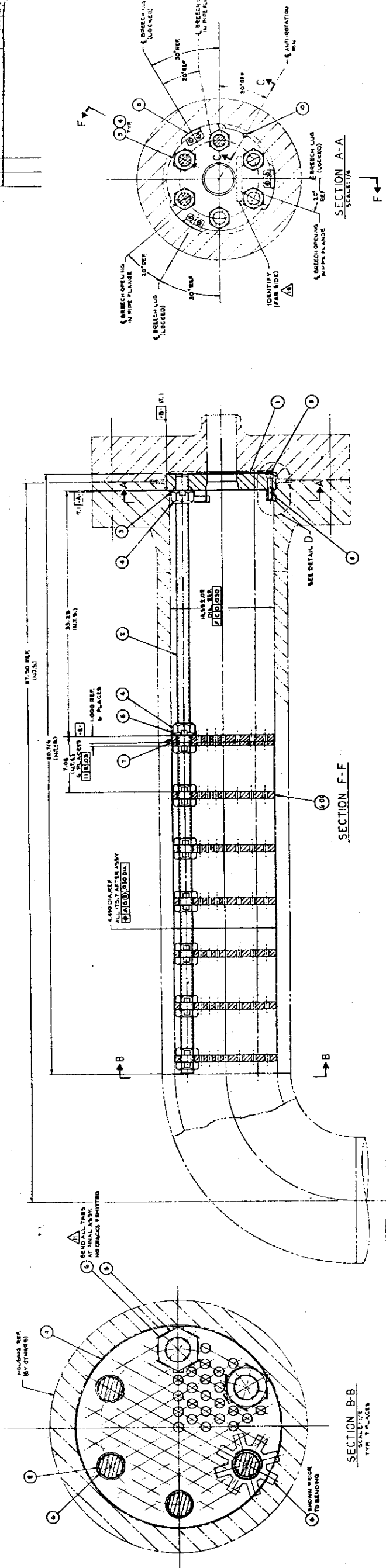
Table 4.5 Pressure at Operating Loop Cold Leg  
with and without Mixture Level in  
Upper Plenum

Time (sec)	Pressure at Operating Loop Cold Leg (psia)	
	Case 4	Case 5
0	2281.7	2281.7
1	933.7	933.7
2	928.0	928.0
4	911.2	911.1
6	904.0	904.1
8	892.9	893.3
10	884.7	884.4
12	866.5	866.1
14	833.0	832.3
16	796.1	794.9
18	754.9	752.4
20	707.7	704.2
22	655.5	651.4
24	598.3	594.2
26	537.5	533.4
28	474.3	469.3
30	410.6	404.5
32	348.6	342.4
34	290.2	

Table 4.6 Saturation Times and Movements of Mixture Levels in Case 18

Time (sec)	Comment
0.5	SG Outlet (V5) Saturated
0.6	SG Inlet (V4) Saturated
1.8	Operating Loop Pumps (V7,V8) Saturated
2.0	Blowdown Loop Cold Leg (V21) Saturated
2.3	Downcomer (V11) Saturated
2.5	Operating Loop Cold Leg (V10) Saturated
3.0	Operating Loop Hot Leg (V1) Saturated
3.4	Blowdown Loop Hot Leg (V15) Saturated
3.5	Upper Plenum (V14) Saturated
	Flow at Operating Loop Hot Leg (J15) Reversed
4.2	Flow at Lower Plenum Inlet (J12) Reversed
4.5	Lower Plenum (V12) Saturated
4.6	Core (V13) Saturated
6.8	Downcomer Mixture Level Reached at Top of Cold Leg
7.4	Upper Plenum Mixture Level Reached at Top of Hot Leg
7.8	Pressurizer Mixture Level Reached at Top of Outlet
8.5	Upper Plenum Mixture Level Reached at Bottom of Hot Leg
10.3	Zero Mixture Level in Upper Plenum
~11.6	
12.0	Pressurizer Pressure Decreased to System Pressure
12.4	Reflood Enhancing Bypass at Hot Leg (V24) Saturated
12.6	Reflood Enhancing Bypass at Cold Leg (V24) Saturated
13.9	Upper Plenum Mixture Level Recovered to Bottom of Hot Leg
31.6	Mixture Level in SG Inlet Volume Reached at Top of Inlet
42.7	Upper Plenum Mixture Level Reached at Bottom of Hot Leg

REVISION	DATE	BY	DESCRIPTION
1			
2			



NOTE:  
1. FOR MANUFACTURING AND INSTALLATION NOTES APPLICABLE TO THIS DRAWING, SEE DIVISION 10, 1037-05-00.

NO.	DESCRIPTION	QTY	UNIT	REMARKS
1	ANTI-ROTATION PIN	1	PC	
2	HEX SOCKET CAP SCREW	8	PC	3/8" DIA
3	GREEN LUG	1	PC	
4	OFFICE PLATE	1	PC	
5	TAB LOCK WASHER	1	PC	
6	HEAVY HEX NUT	1	PC	
7	TAB LOCK WASHER	1	PC	
8	SUPPORT PLATE	1	PC	
9	STEAM GENERATOR	1	PC	

MFR ASSOCIATES	
DATE: 10/31/74	SCALE: 1/4"
PROJECT: 1037-05-00	
DRAWN: [Name]	
CHECKED: [Name]	
APPROVED: [Name]	

Fig. 4.1 Steam Generator Simulator





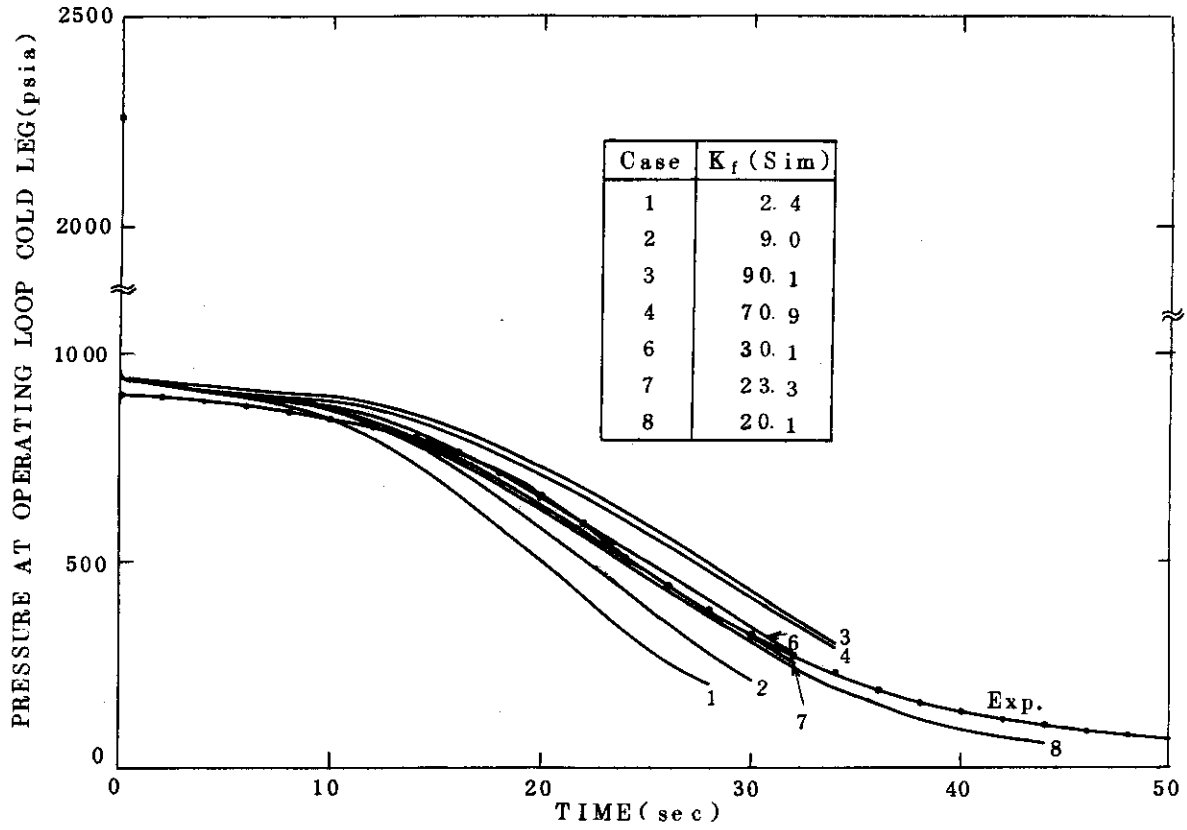


Fig. 4.3 Pressure Transient at Operating Loop Cold Leg with Different Form Loss Coefficients for SG and Pump Simulators

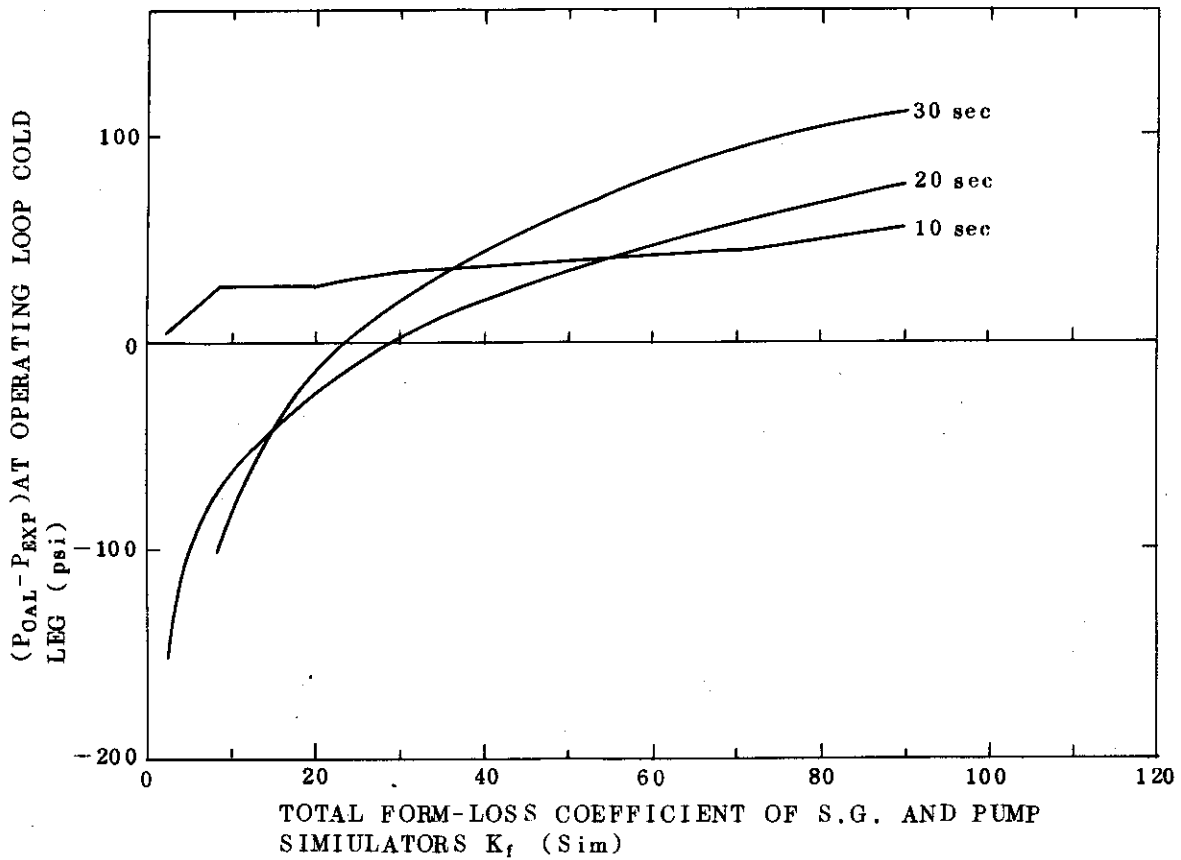


Fig. 4.4 Pressure at Operating Loop Cold Leg as a Function of Form Loss Coefficients for SG and Pump Simulators

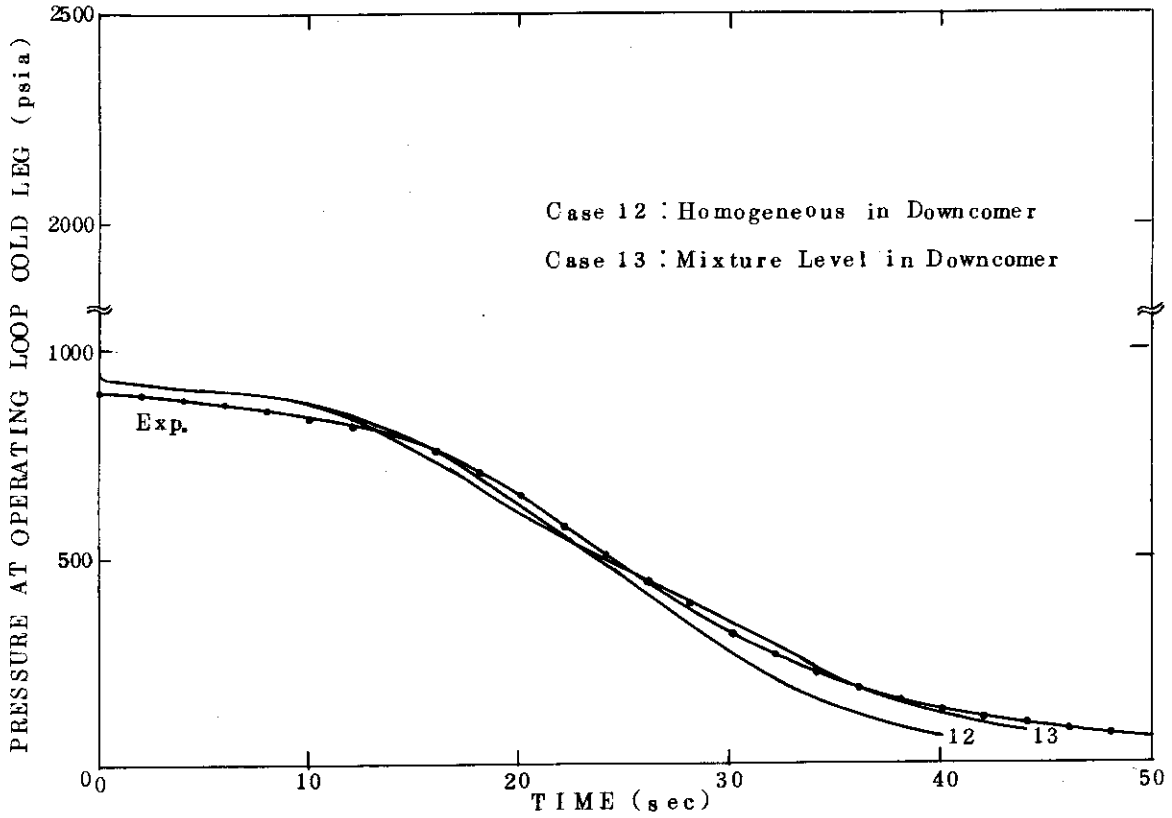


Fig. 4.5 Pressure Transient at Operating Loop Cold Leg with and without Mixture Level in Downcomer

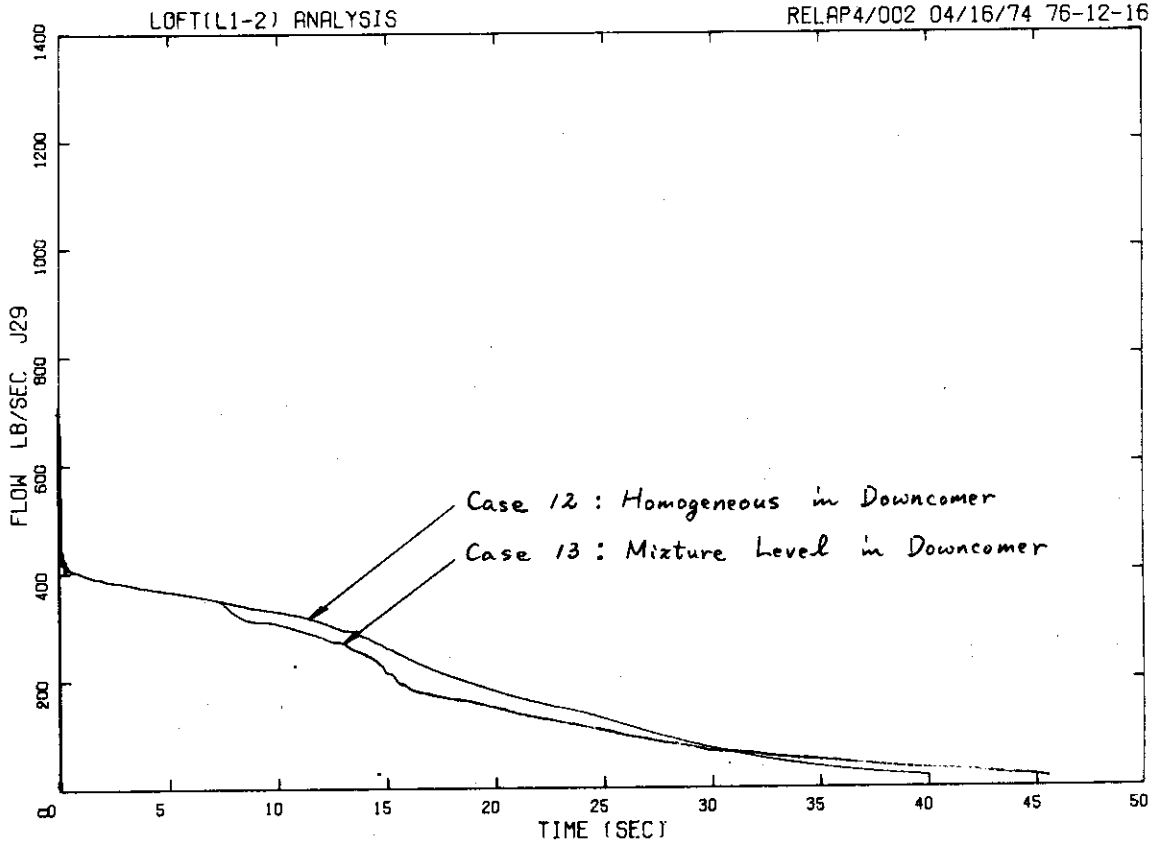


Fig. 4.6 Break Flow from Vessel with and without Mixture Level in Downcomer

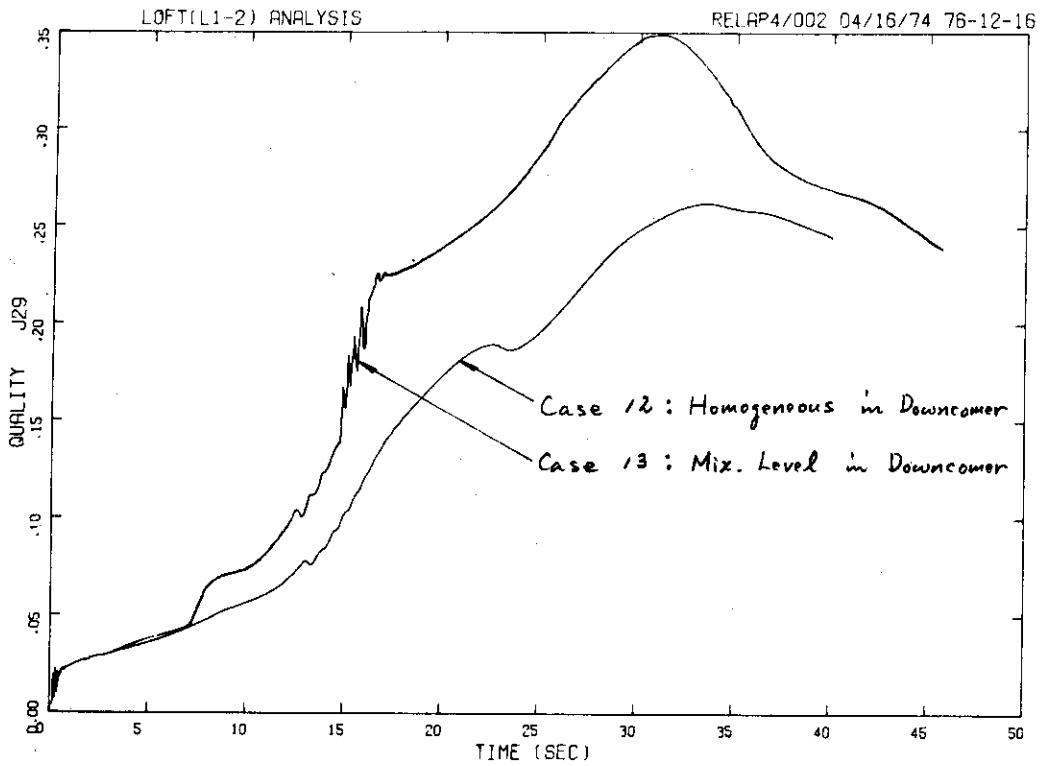


Fig. 4.7 Break Quality from Vessel with and without Mixture Level in Downcomer

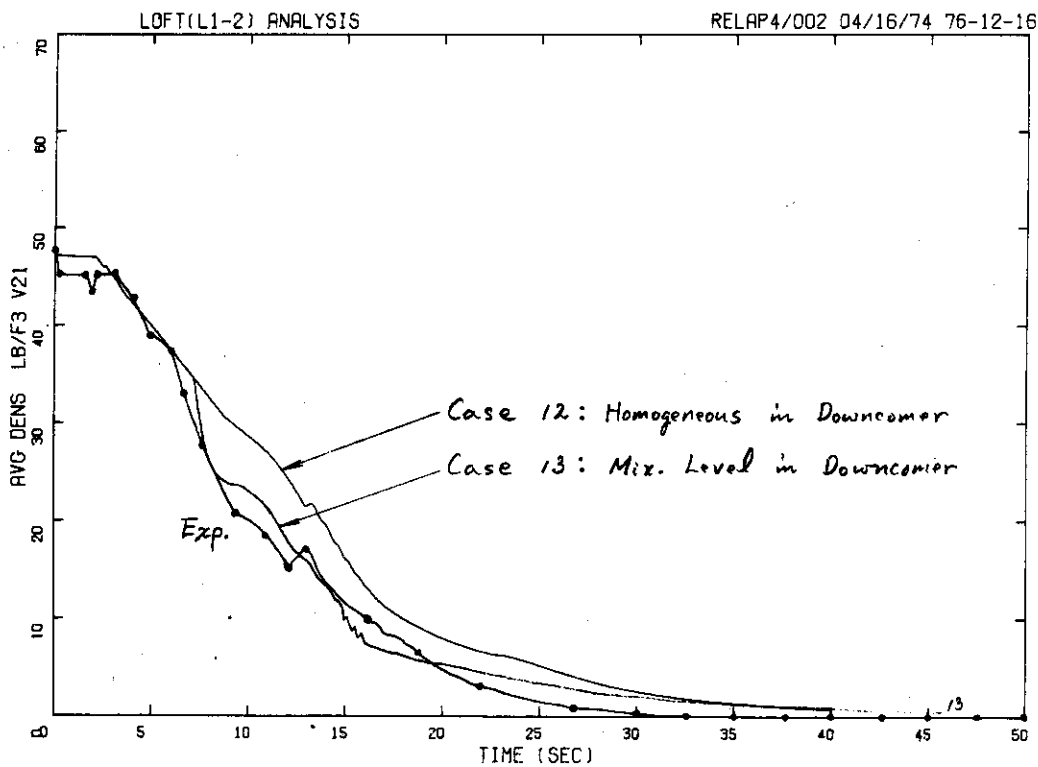


Fig. 4.8 Average Density at Blowdown Loop Cold Leg with and without Mixture Level in Downcomer

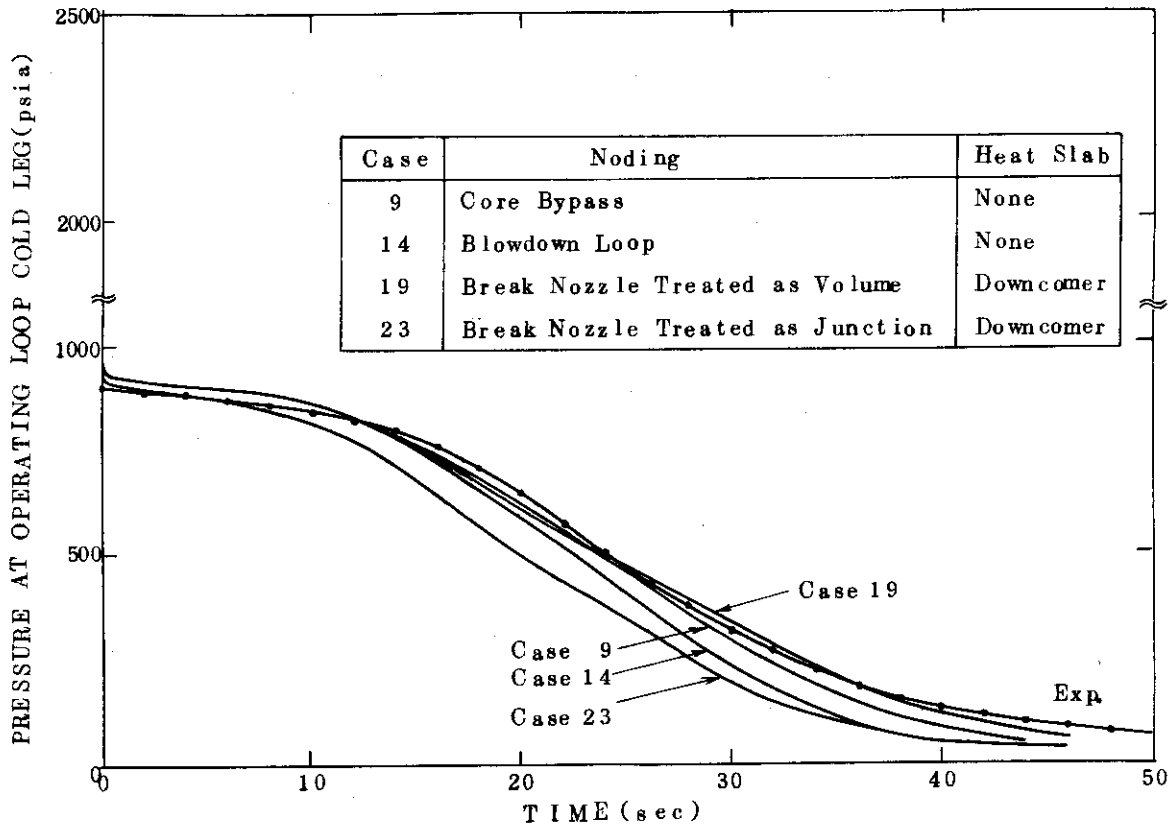


Fig. 4.9 Pressure Transient at Operating Loop Cold Leg with Different Nodings

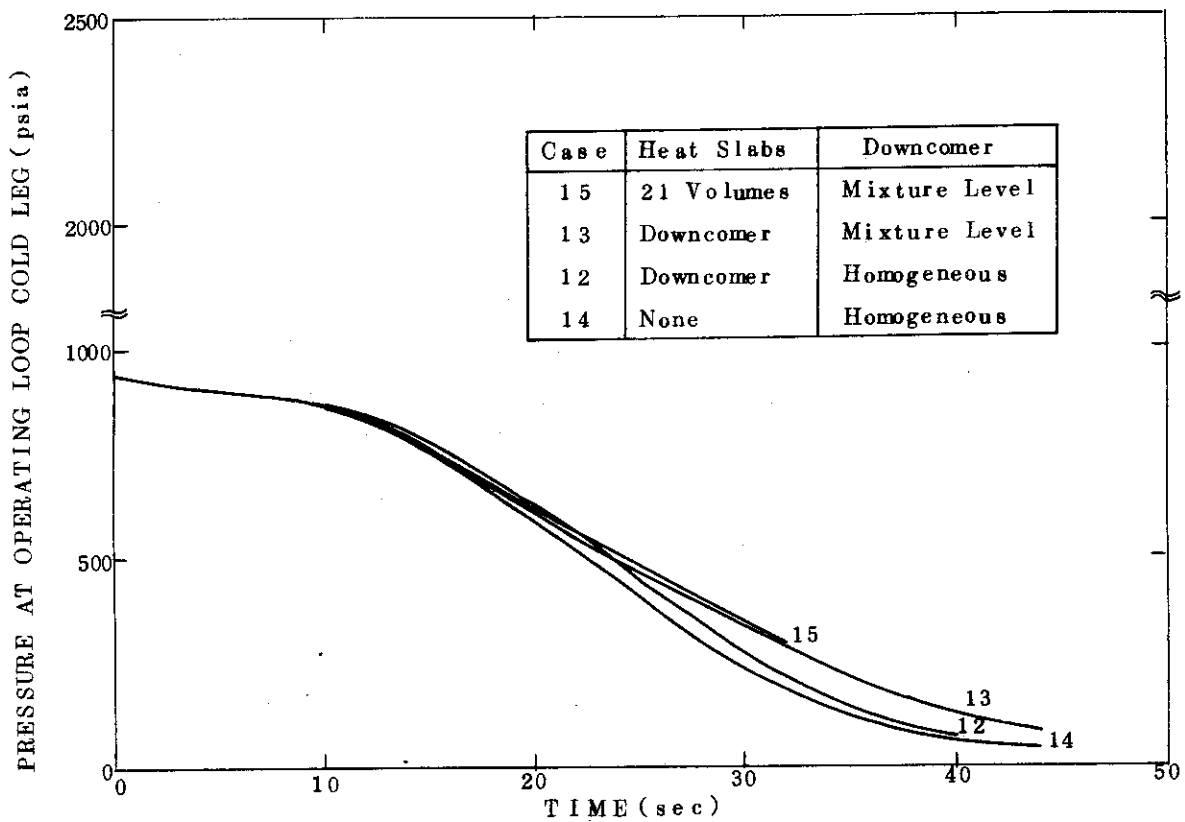


Fig. 4.10 Effects of Heat Slabs for Pressure Transient at Operating Loop Cold Leg

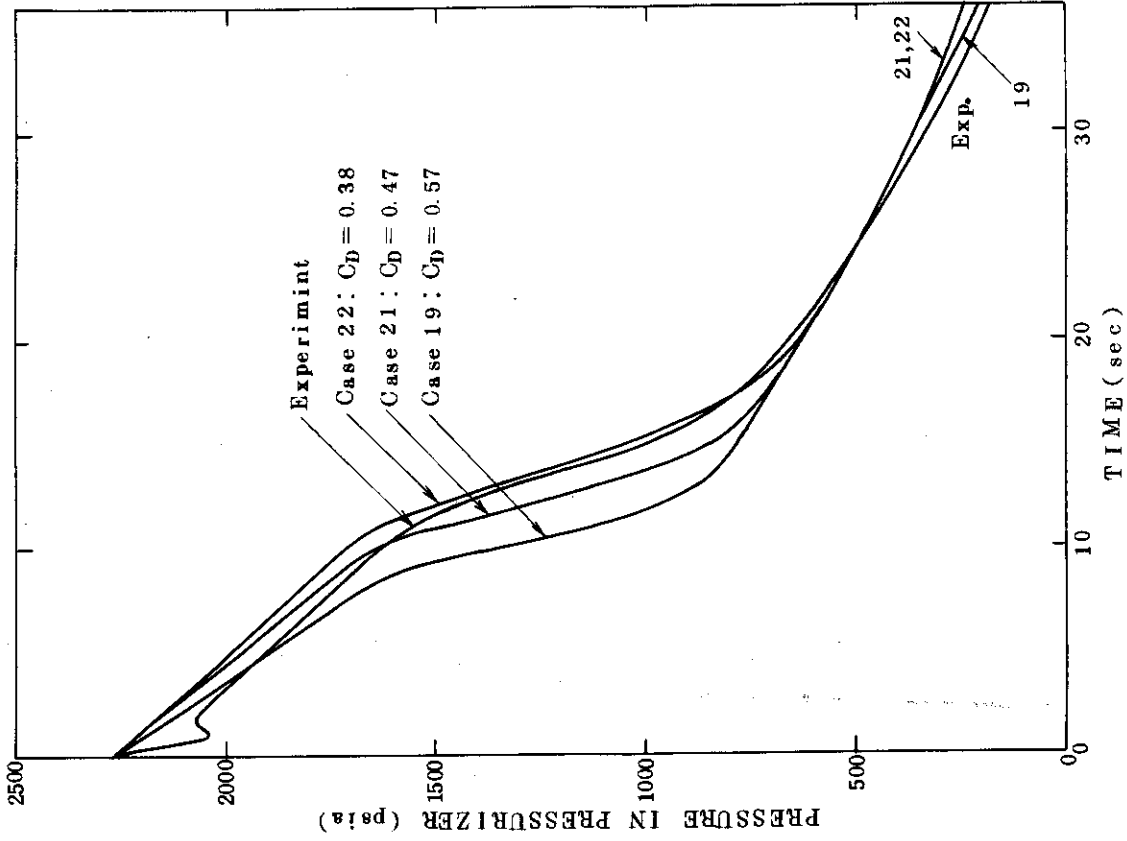


Fig. 4.12 Effects of Discharge Coefficient at Surge Line Outlet for Pressure Transient in Pressurizer

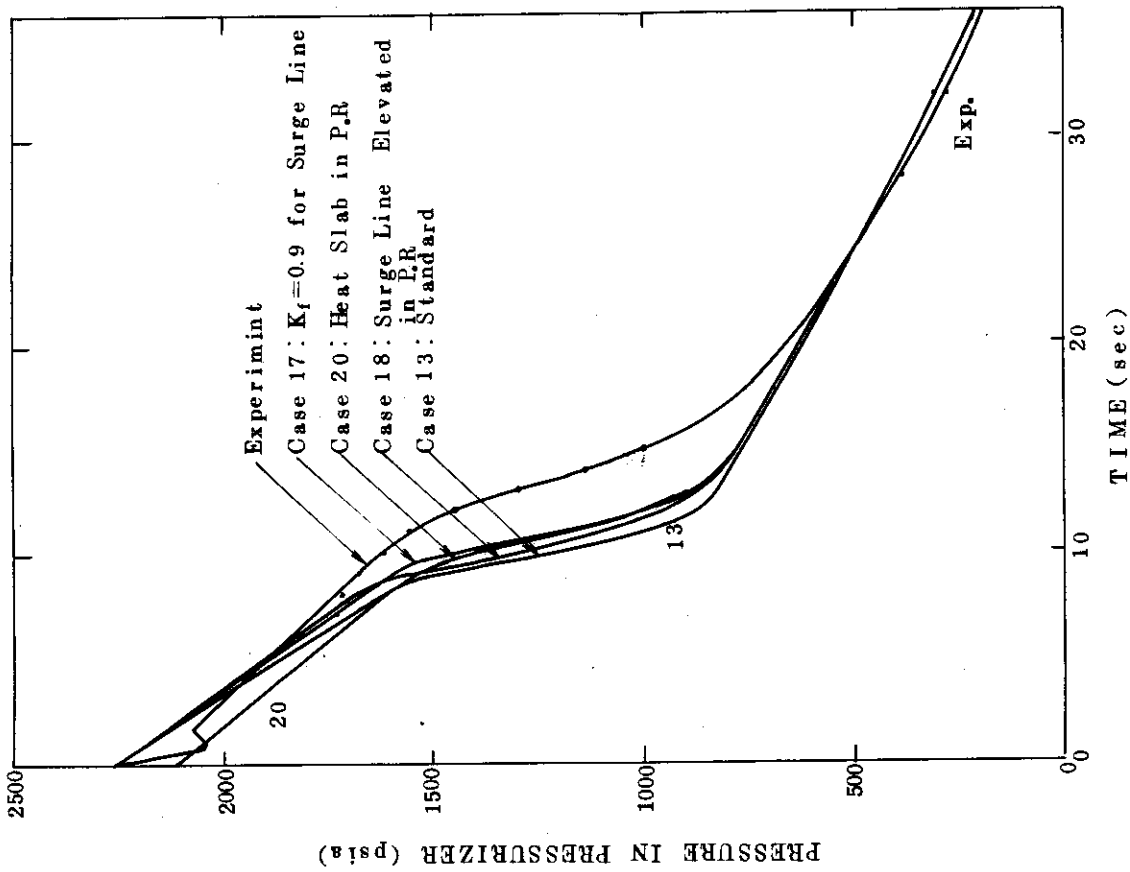


Fig. 4.11 Effects of Pressurizer Input Data for Pressure Transient in Pressurizer

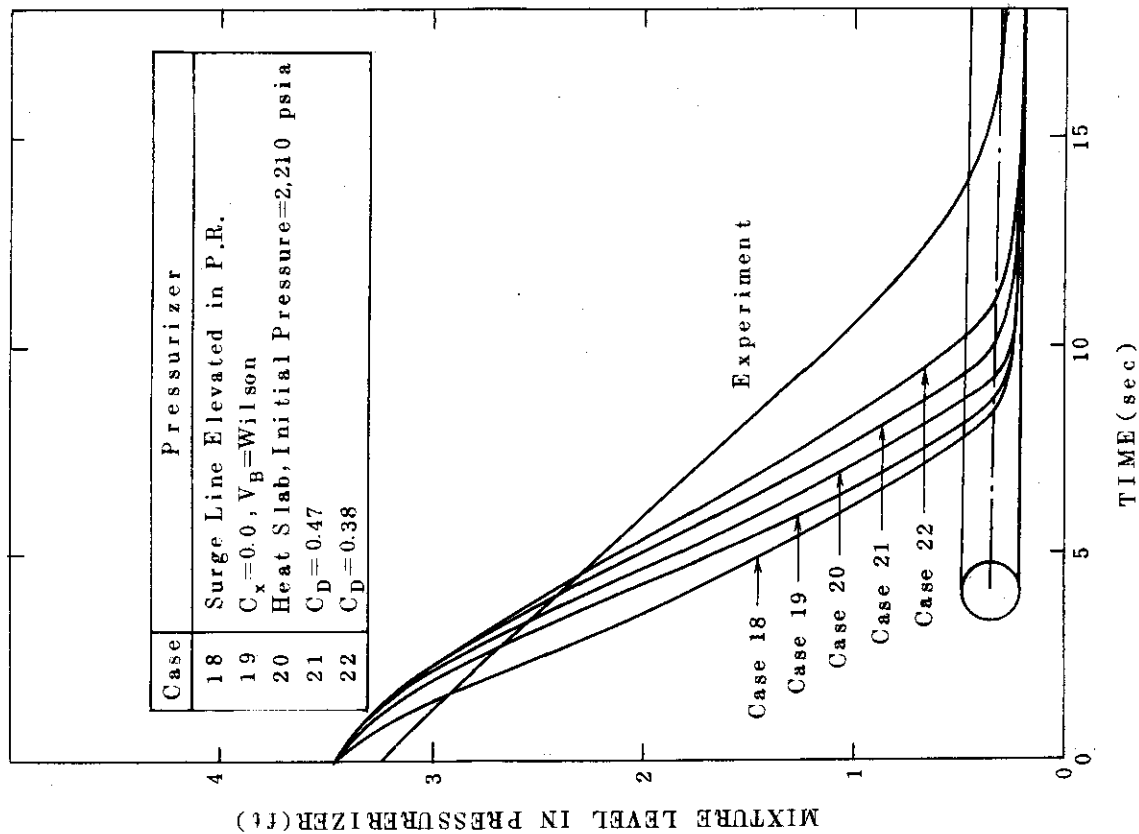


Fig. 4.14 Effects of Pressurizer Data for Mixture Level Transient in Pressurizer

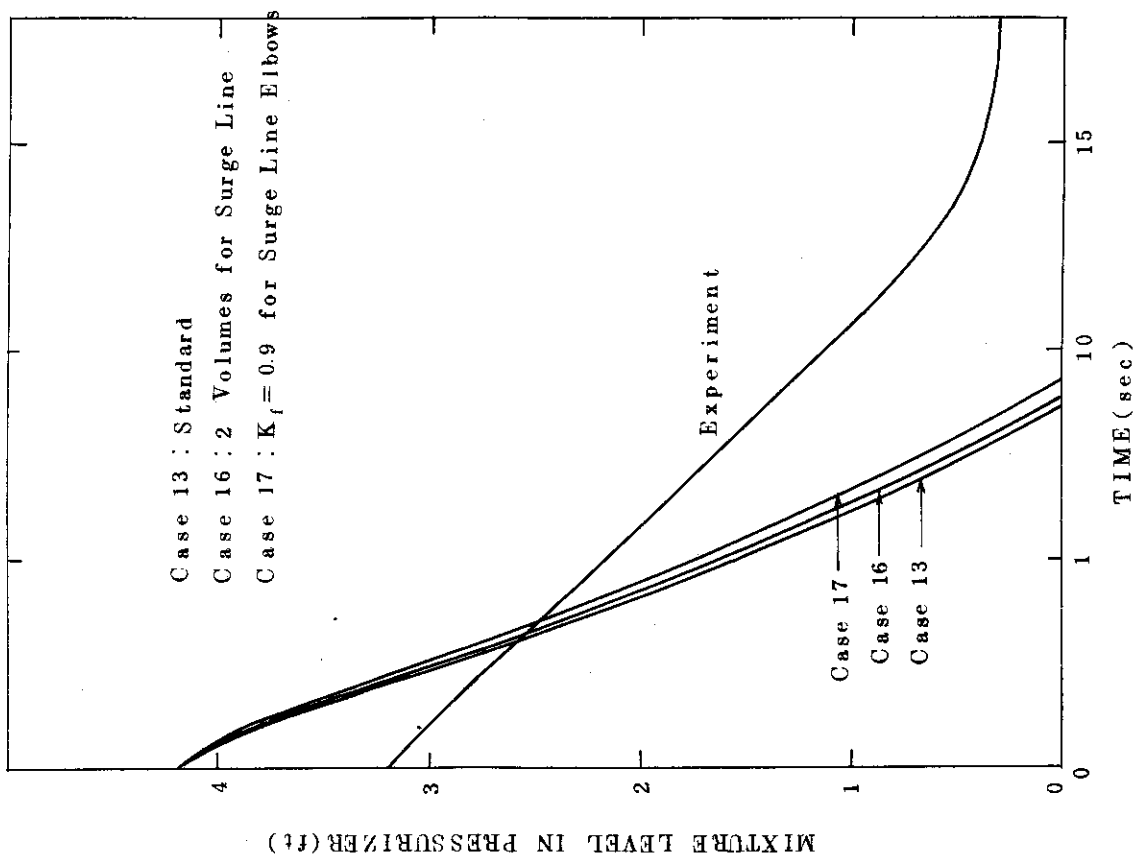


Fig. 4.13 Effects of Surge Line Data for Mixture Level Transient in Pressurizer

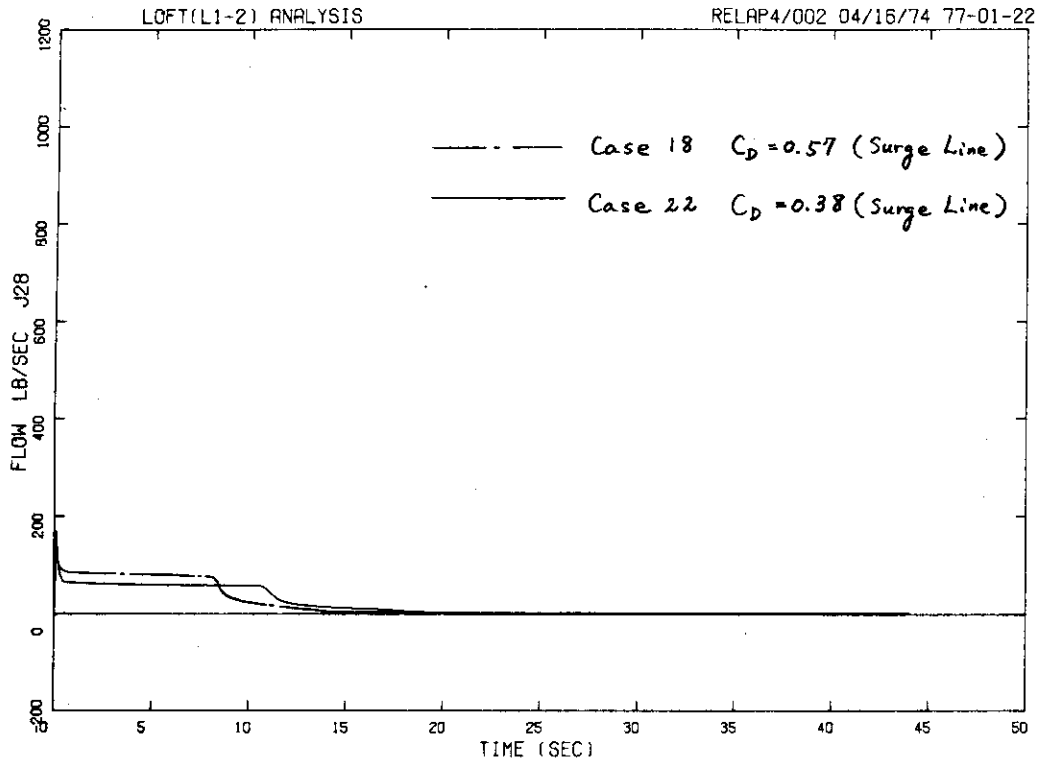


Fig. 4.15 Flow at Pressurizer Surge Line Outlet with Different Discharge Coefficients

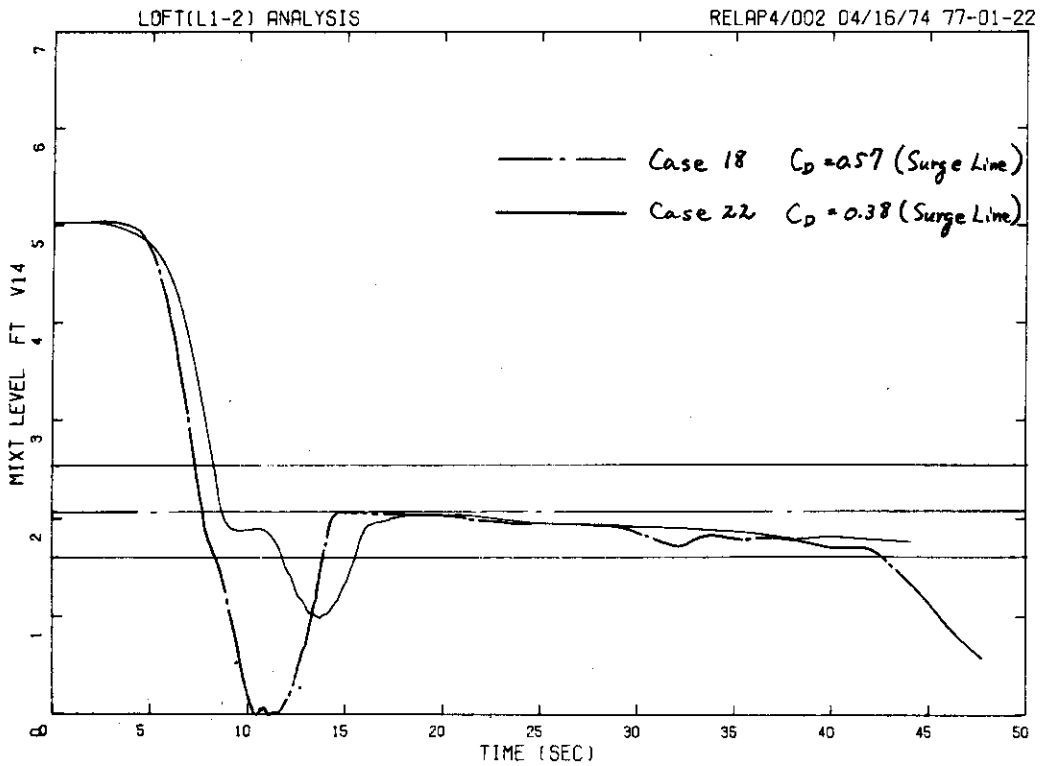


Fig. 4.16 Mixture Level in Upper Plenum with Different Discharge Coefficients at Surge Line Outlet



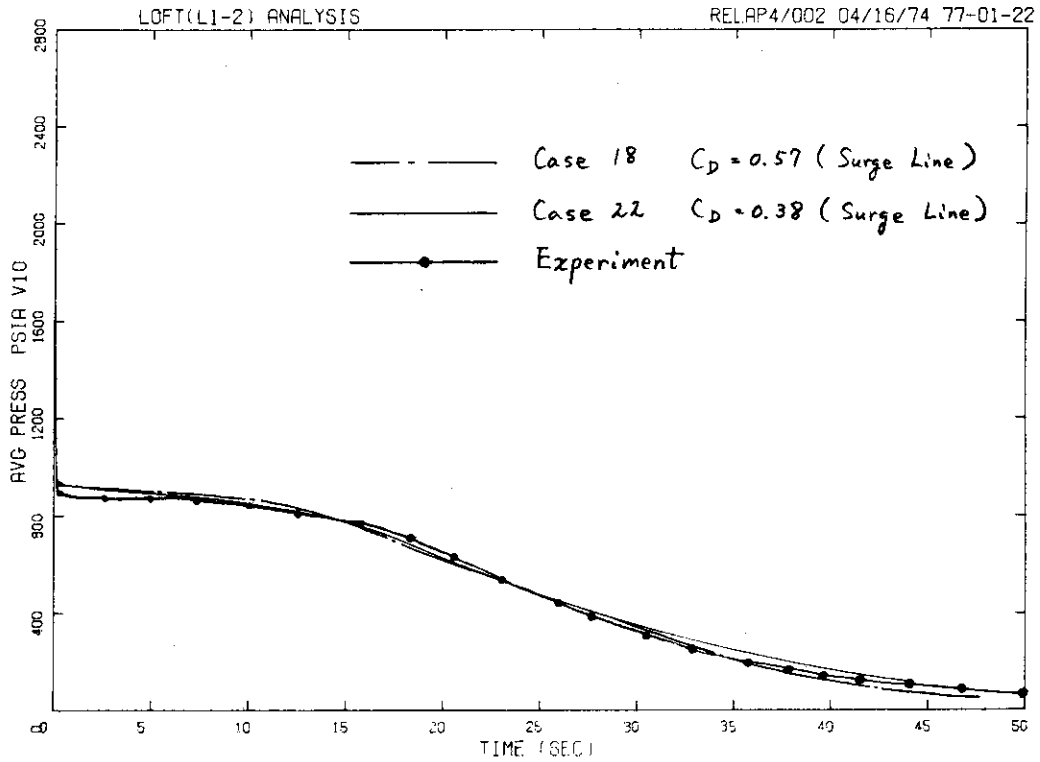


Fig. 4.17 Pressure Transient at Operating Loop Cold Leg with Different Discharge Coefficients at Surge Line Outlet

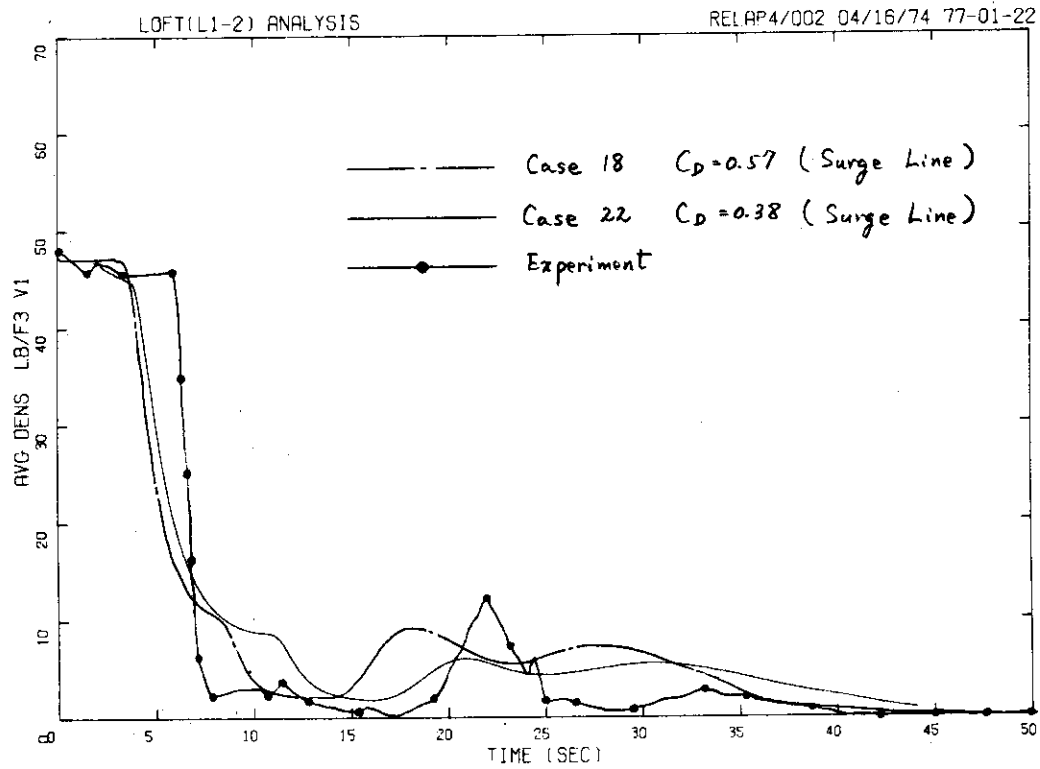


Fig. 4.18 Density at Operating Loop Hot Leg with Different Discharge Coefficients at Surge Line Outlet

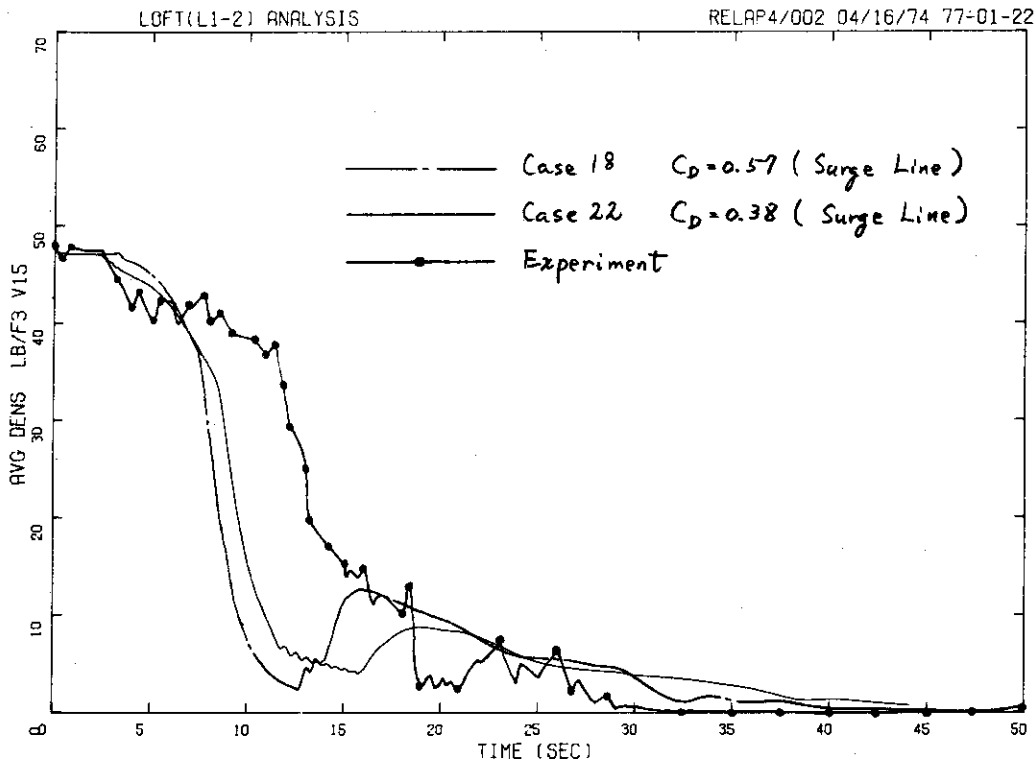


Fig. 4.19 Density at Blowdown Loop Hot Leg with Different Discharge Coefficients at Surge Line Outlet

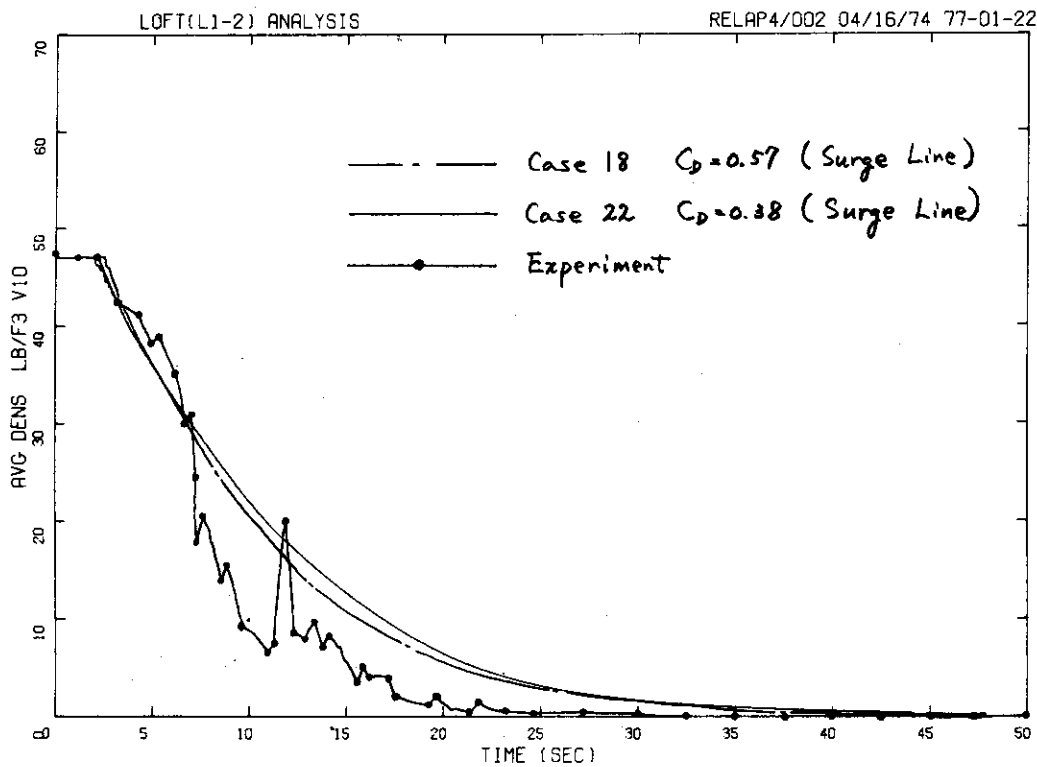


Fig. 4.20 Density at Operating Loop Cold Leg with Different Discharge Coefficients at Surge Line Outlet

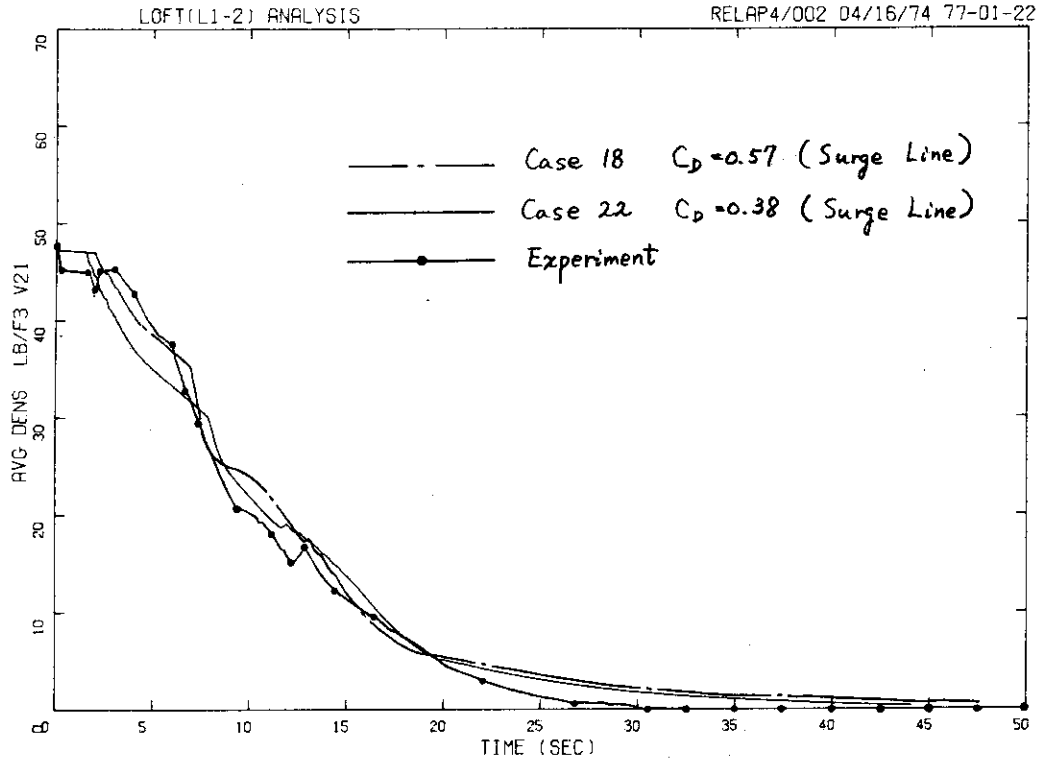


Fig. 4.21 Density at Blowdown Loop Cold Leg with Different Discharge Coefficients at Surge Line Outlet

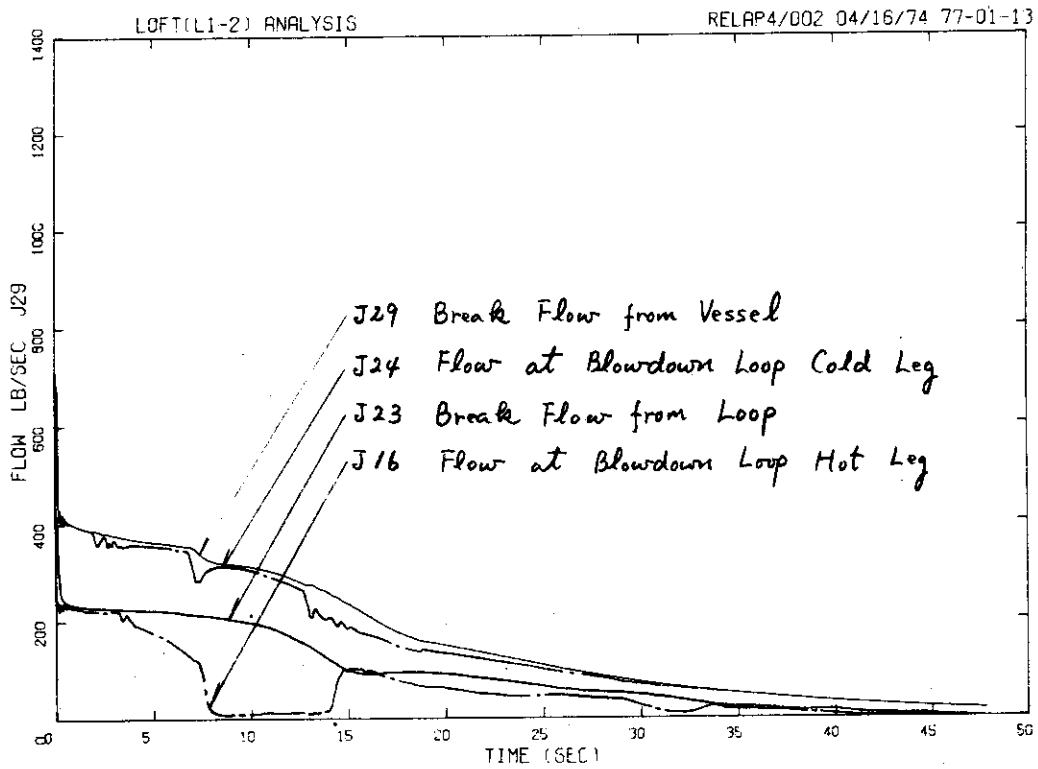


Fig. 4.22 Calculated Flows at Breaks, and Cold and Hot Legs of Blowdown Loop

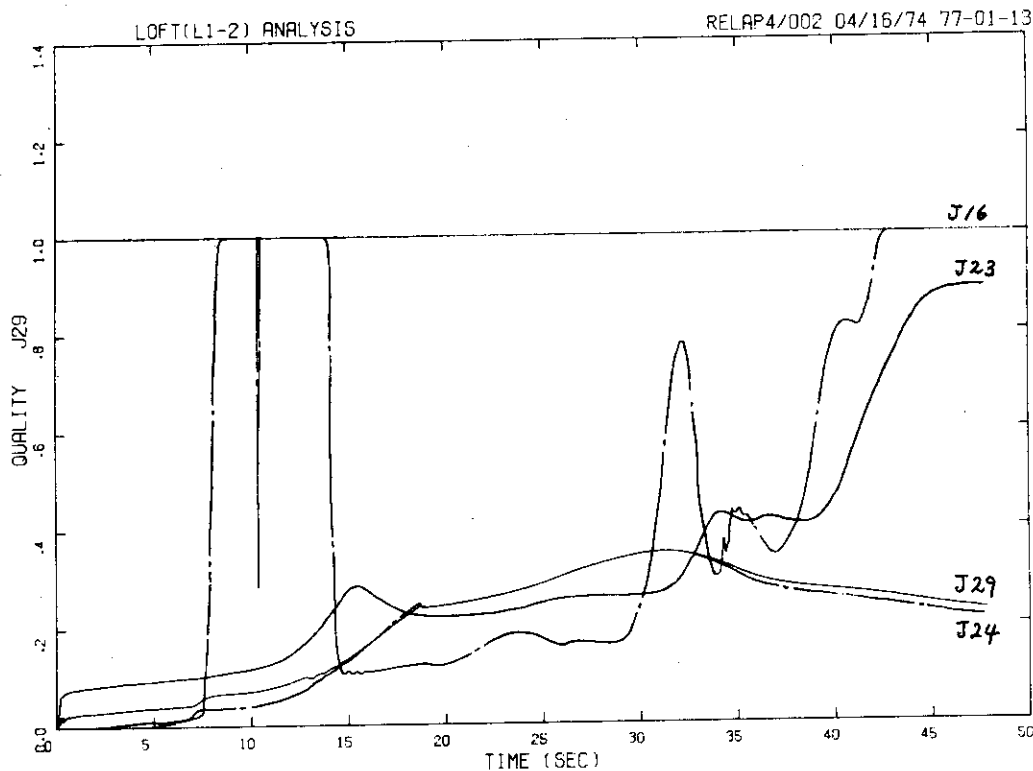


Fig. 4.23 Calculated Qualities at Breaks, and Cold and Hot Legs of Blowdown Loop

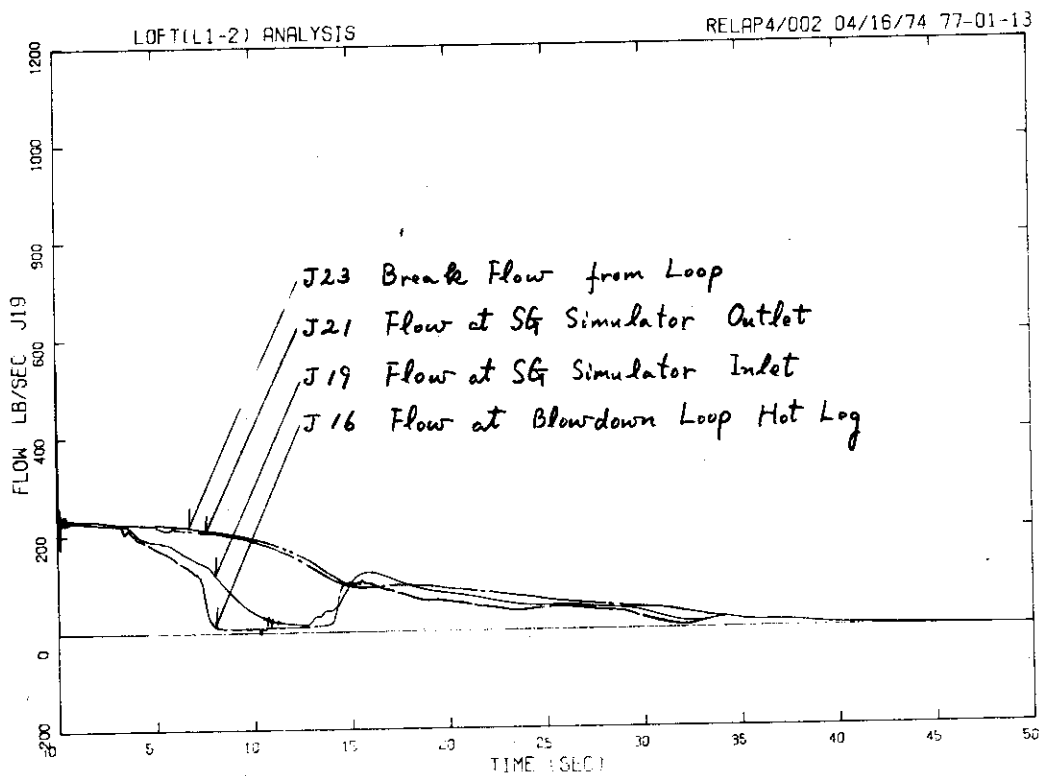


Fig. 4.24 Calculated Flows from Hot Leg to Break of Blowdown Loop

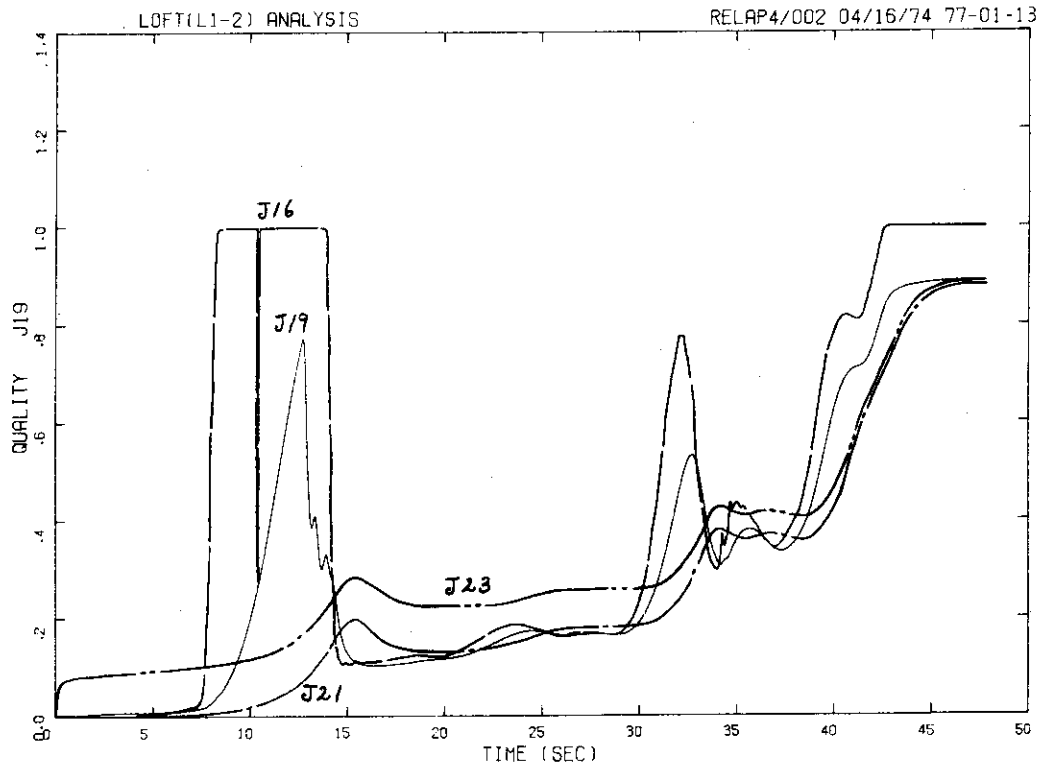


Fig. 4.25 Calculated Qualities from Hot Leg to Break of Blowdown Loop

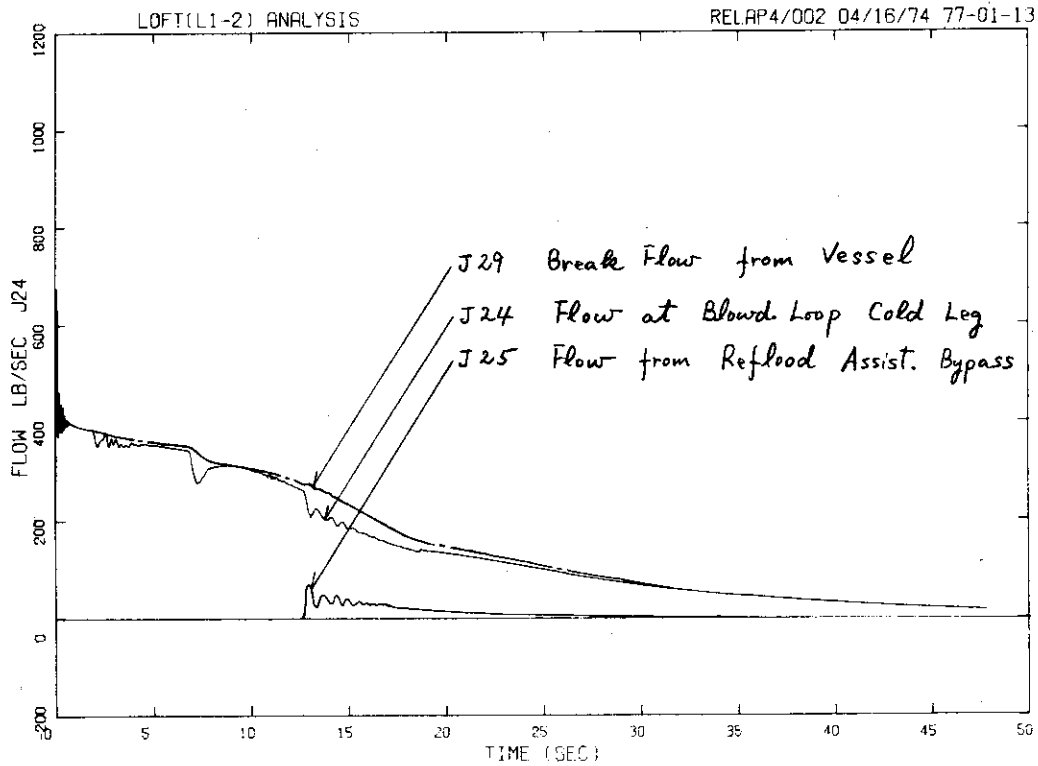


Fig. 4.26 Effects of Reflood Assisting Bypass to Flows at Cold Leg and Break of Blowdown Loop

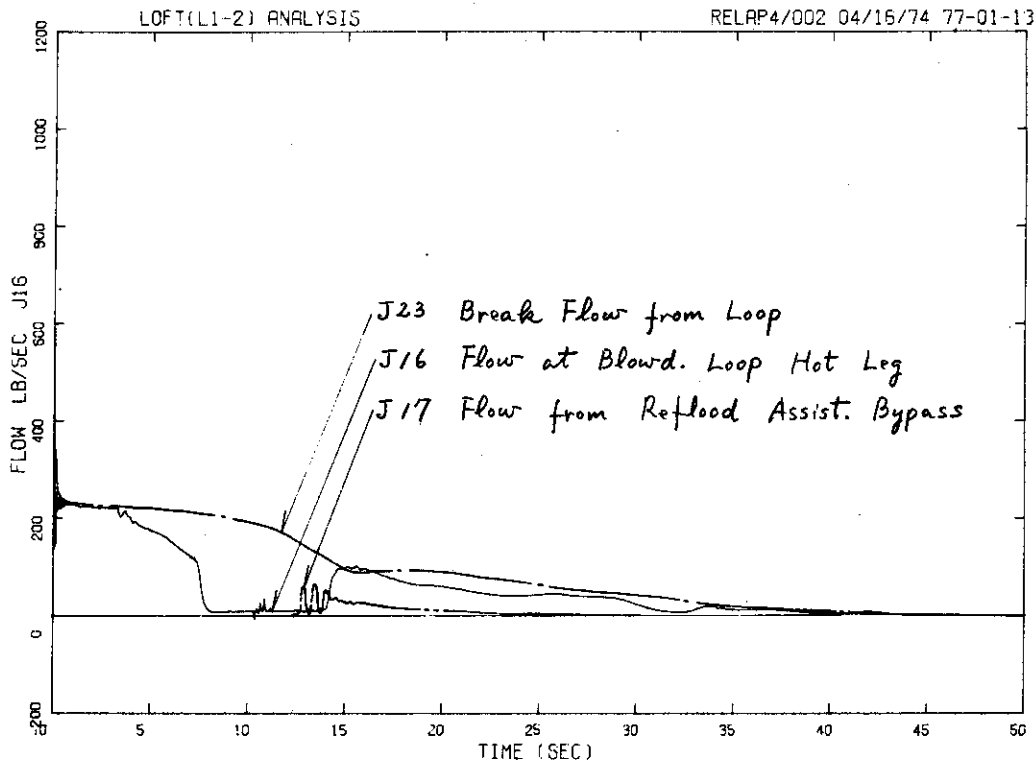


Fig. 4.27 Effects of Reflood Assisting Bypass to Flows at Hot Leg and Break of Blowdown Loop

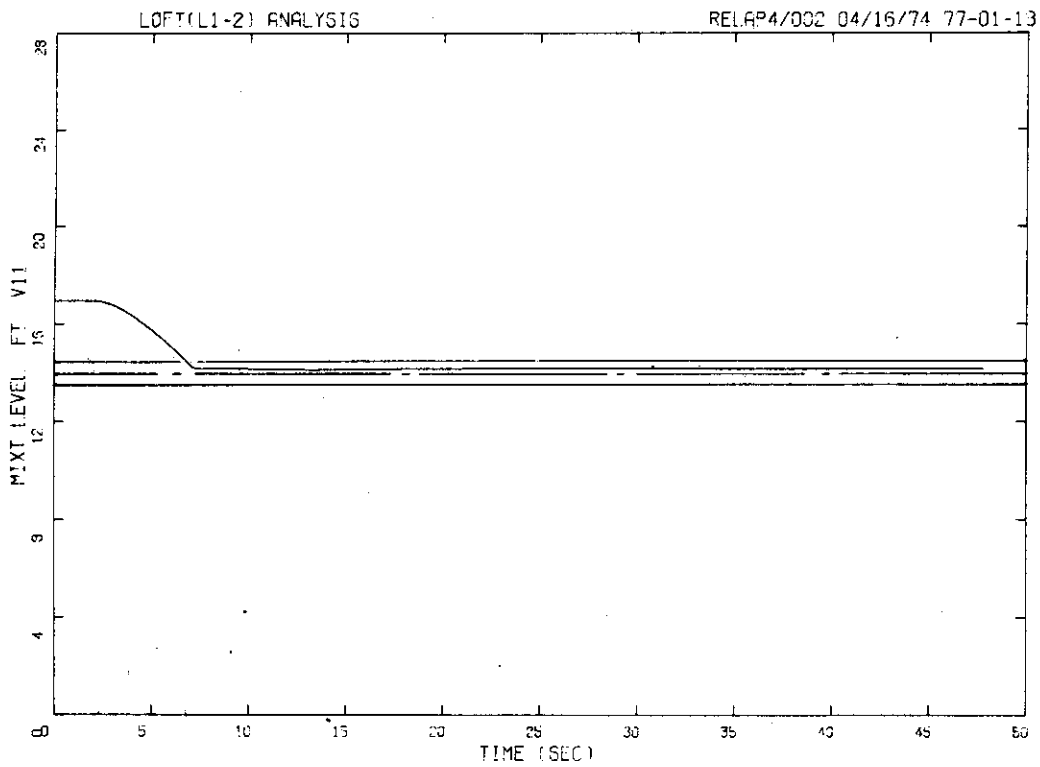


Fig. 4.28 Calculated Mixture Level of Downcomer

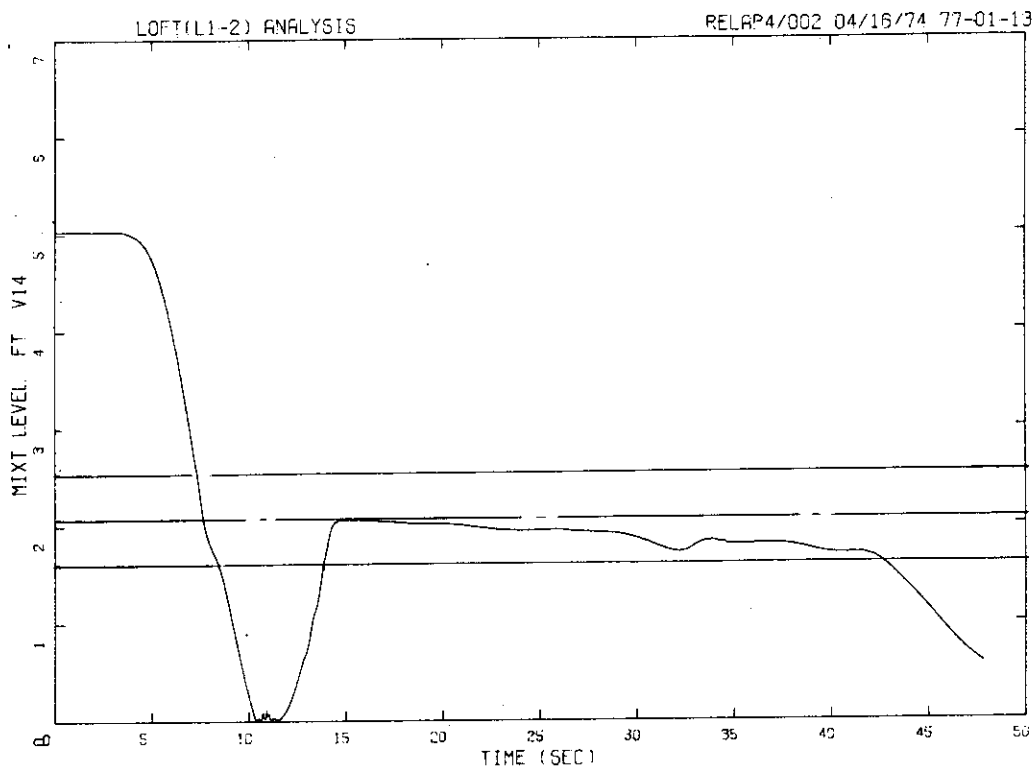


Fig. 4.29 Calculated Mixture Level of Upper Plenum

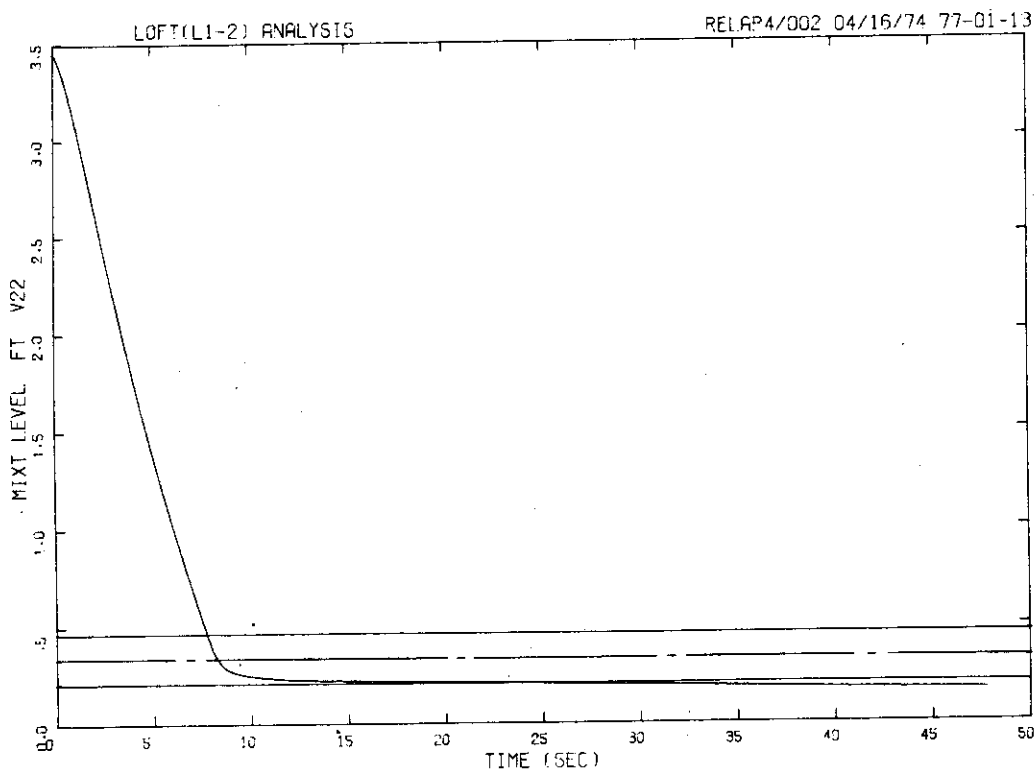


Fig. 4.30 Calculated Mixture Level of Pressurizer

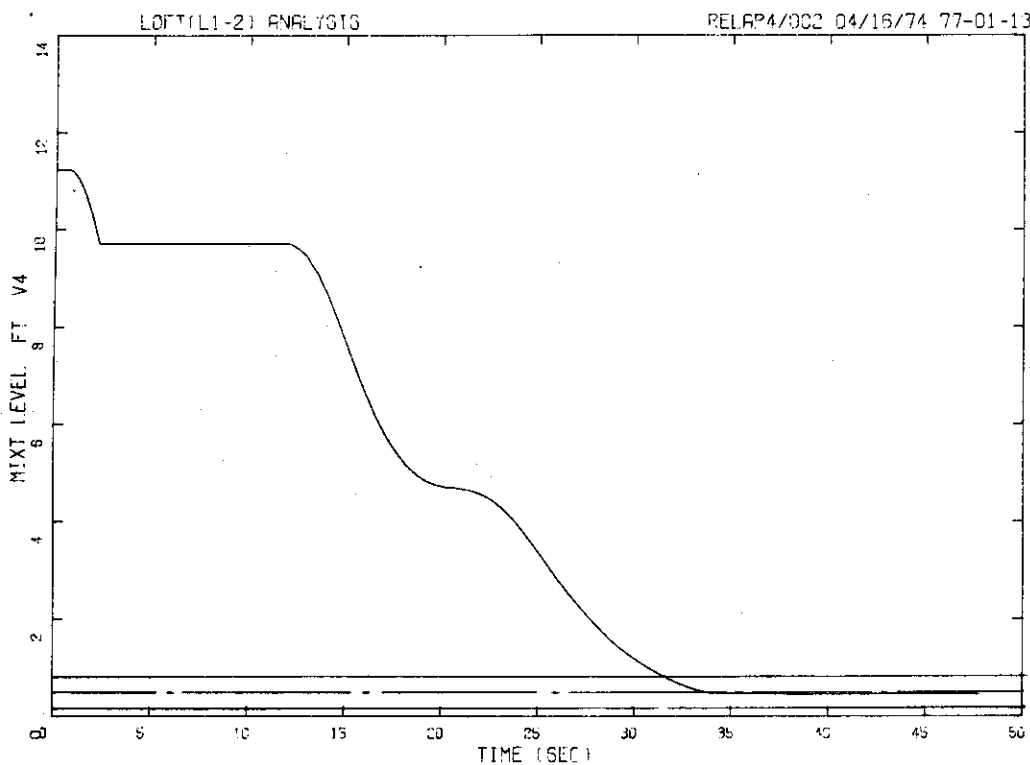


Fig. 4.31 Calculated Mixture Level of SG Inlet-Side Volume

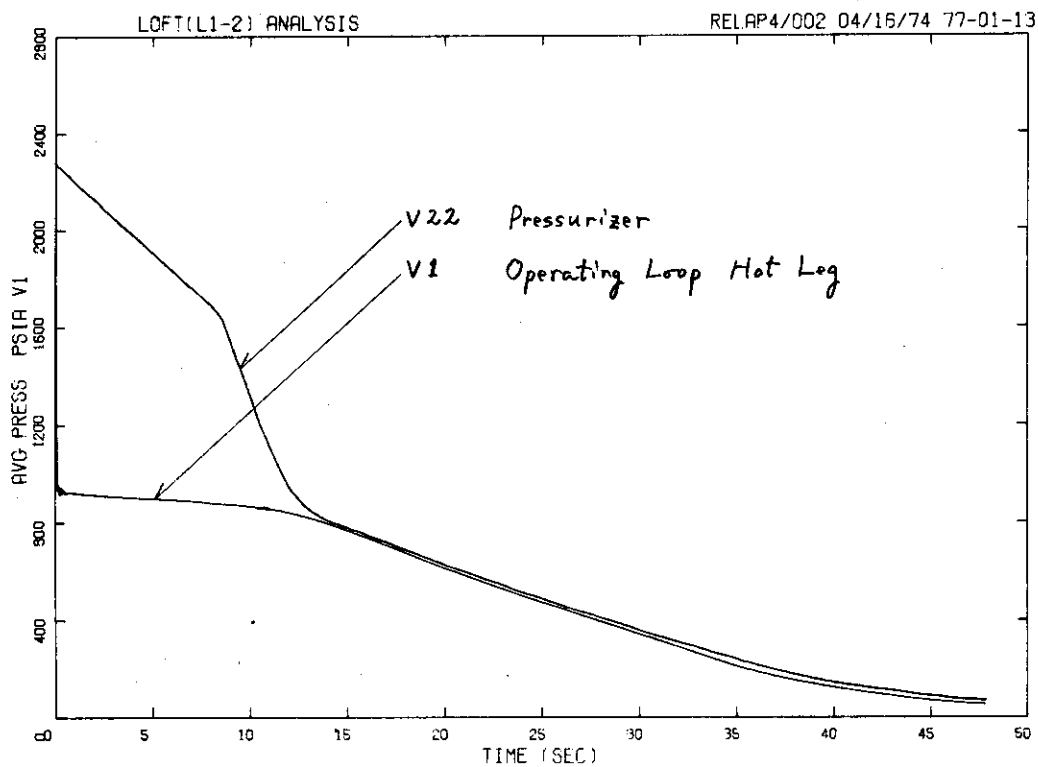


Fig. 4.32 Calculated Pressure Transients of Pressurizer and Operating Loop Hot Leg



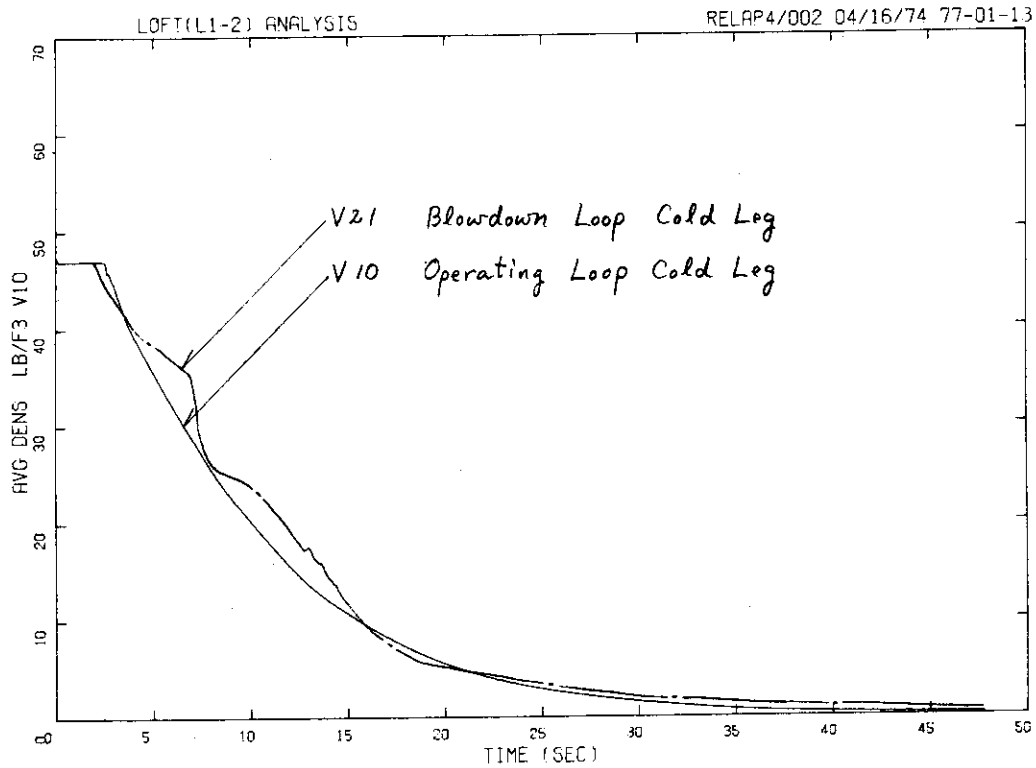


Fig. 4.33 Calculated Densities at Cold Legs of Blowdown and Operating Loops

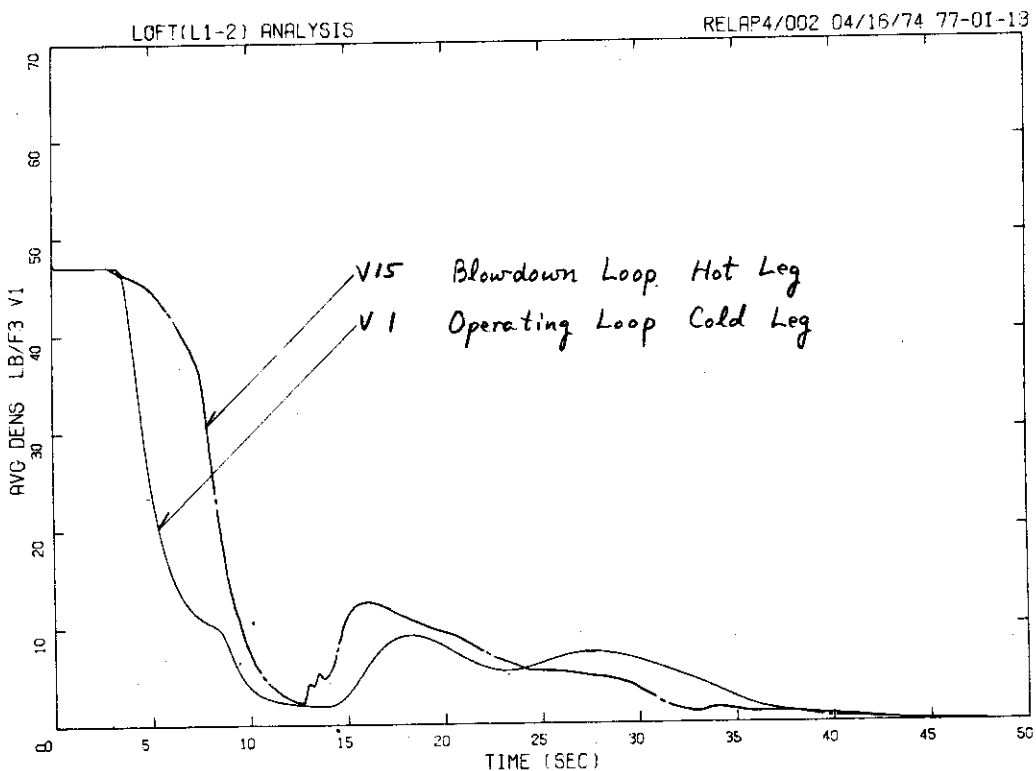


Fig. 4.34 Calculated Densities at Hot Legs of Blowdown and Operating Loops

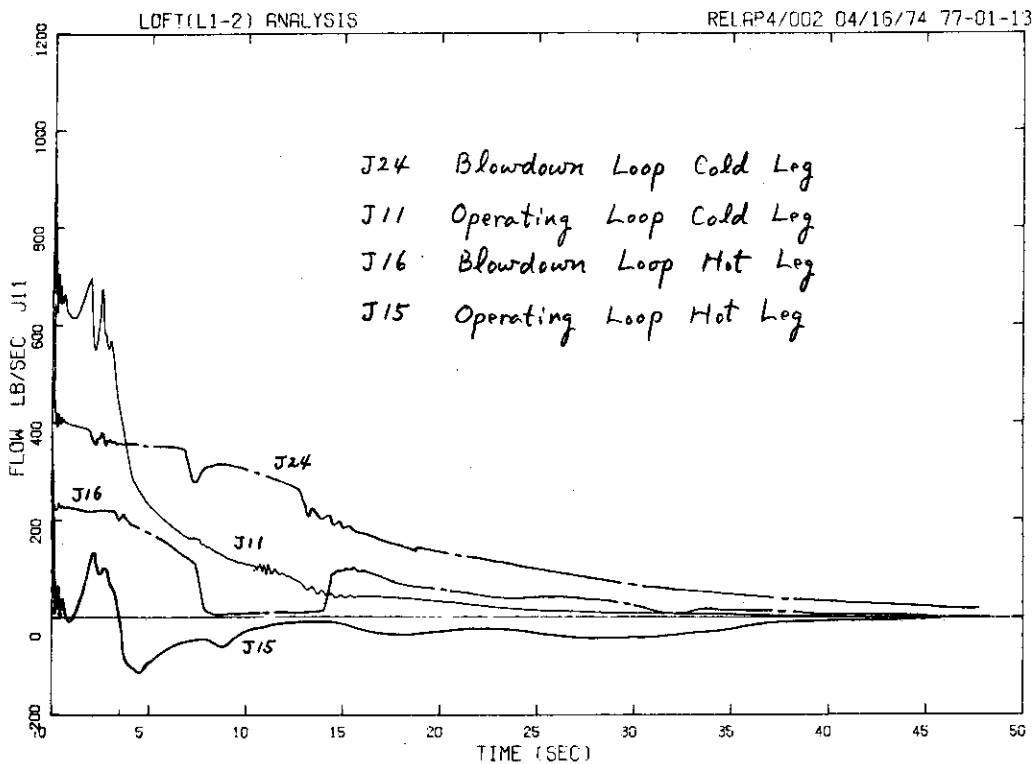


Fig. 4.35 Calculated Flows at Four Legs of Vessel

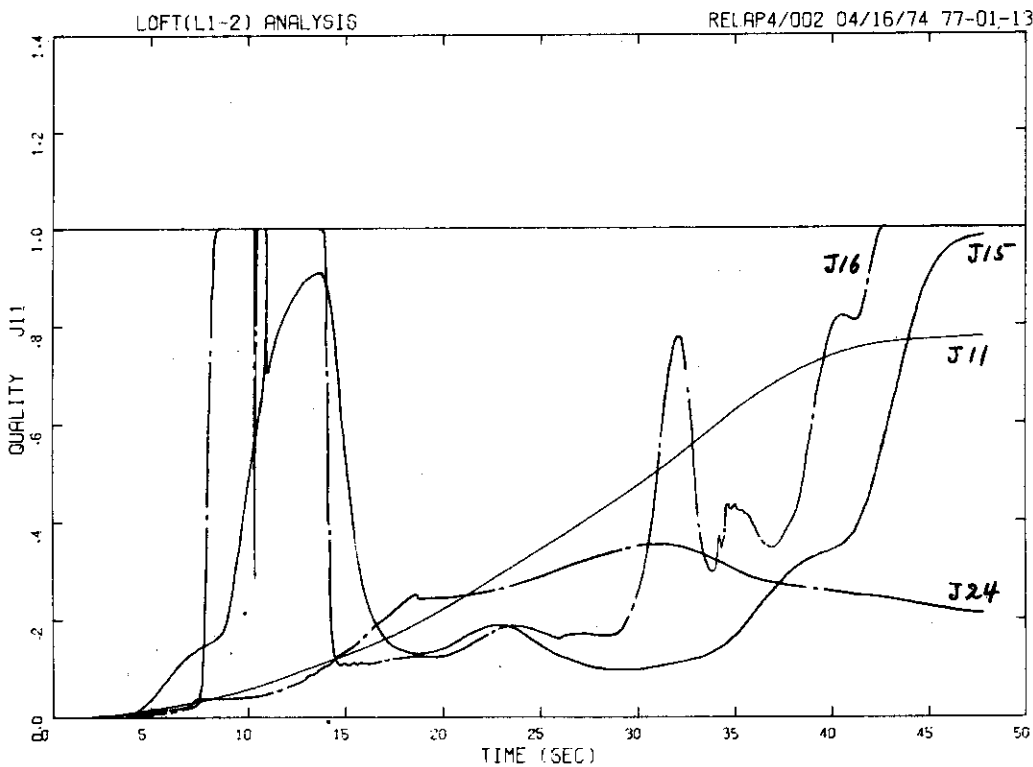


Fig. 4.36 Calculated Qualities at Four Legs of Vessel

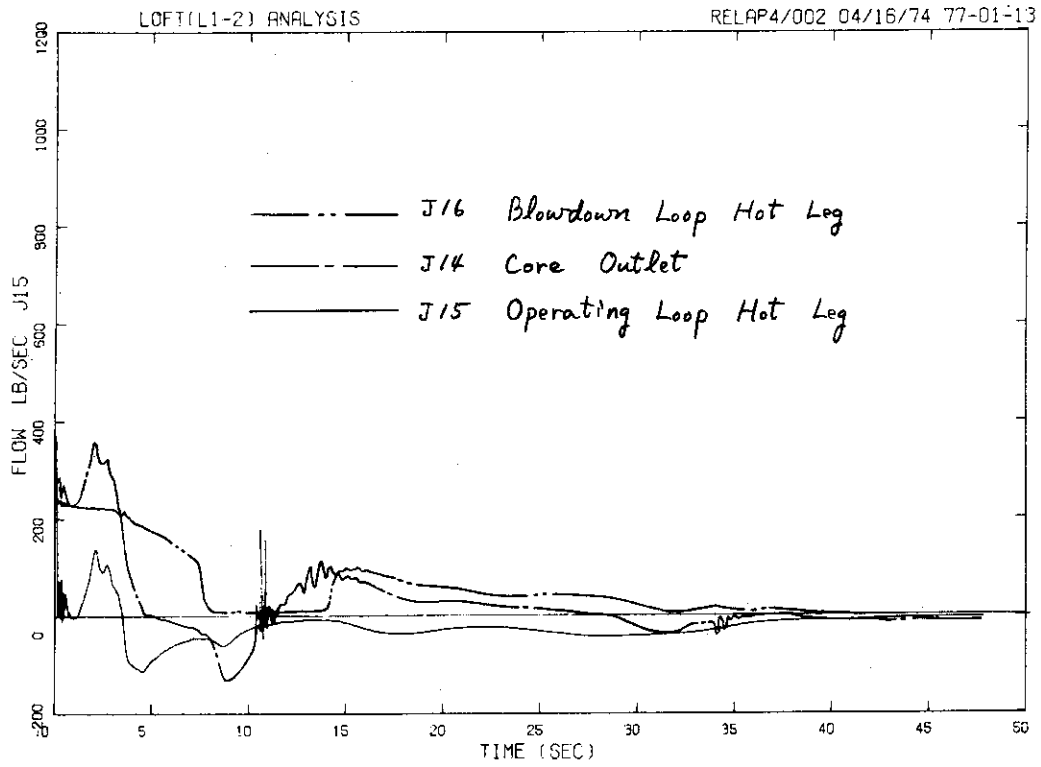


Fig. 4.37 Flow Balance in Upper Plenum

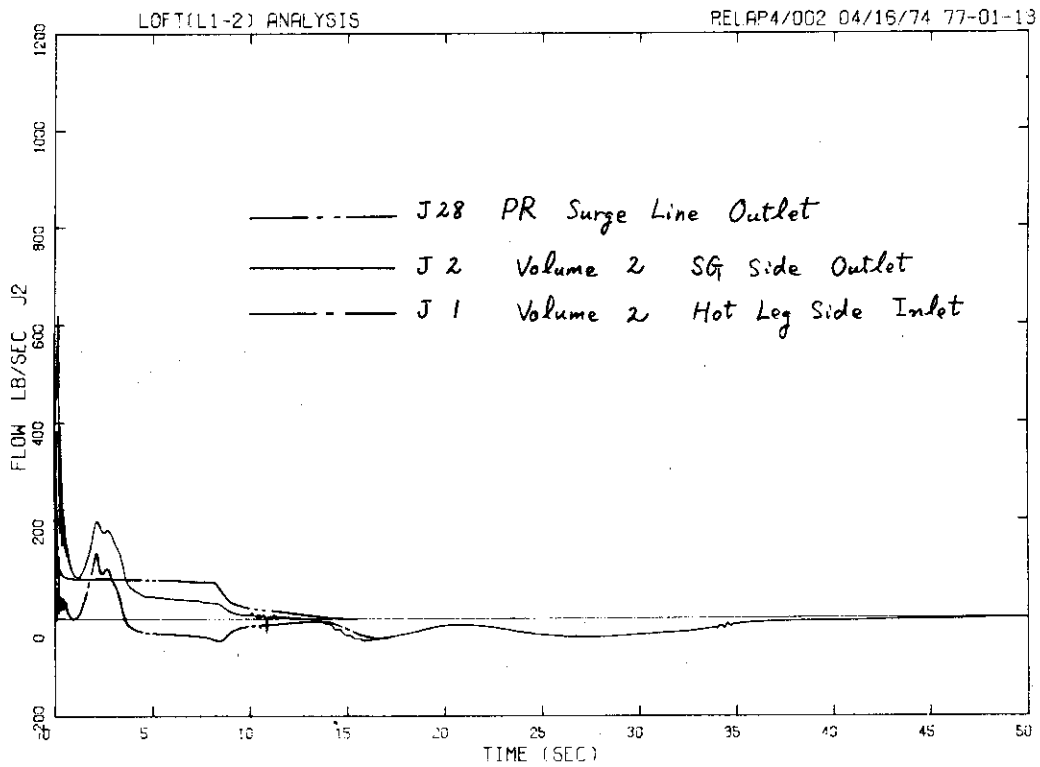


Fig. 4.38 Effect of Pressurizer to Flows of Operating Loop

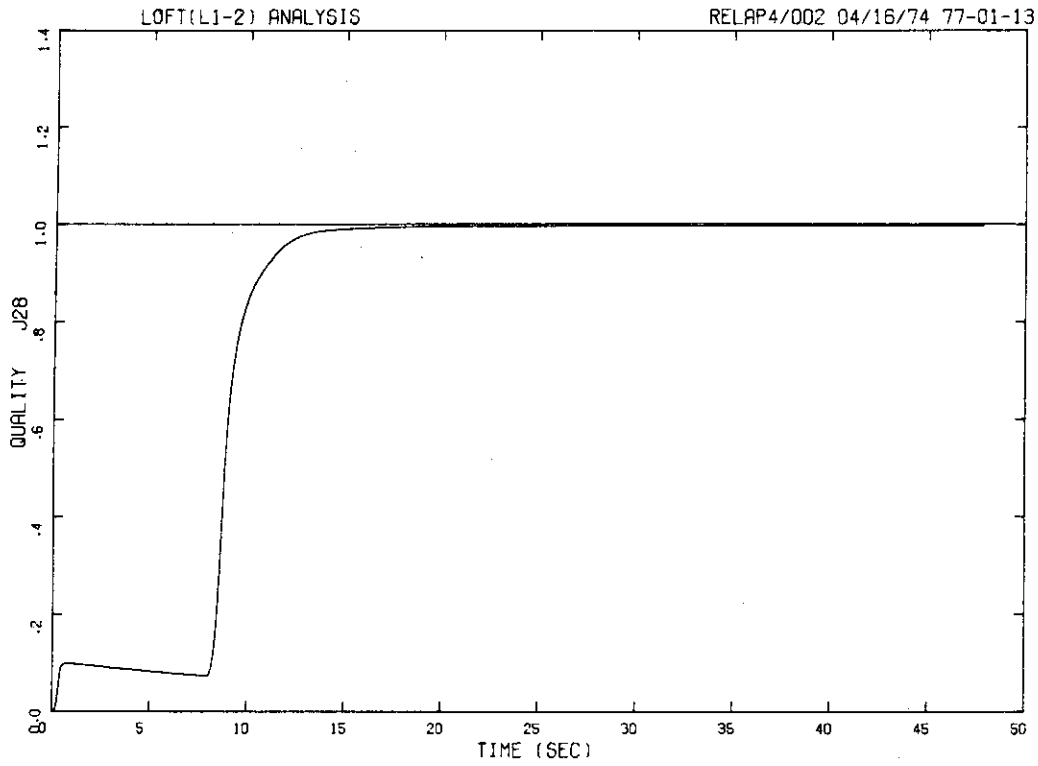


Fig. 4.39 Calculated Quality of Flow at PR Surge Line Outlet

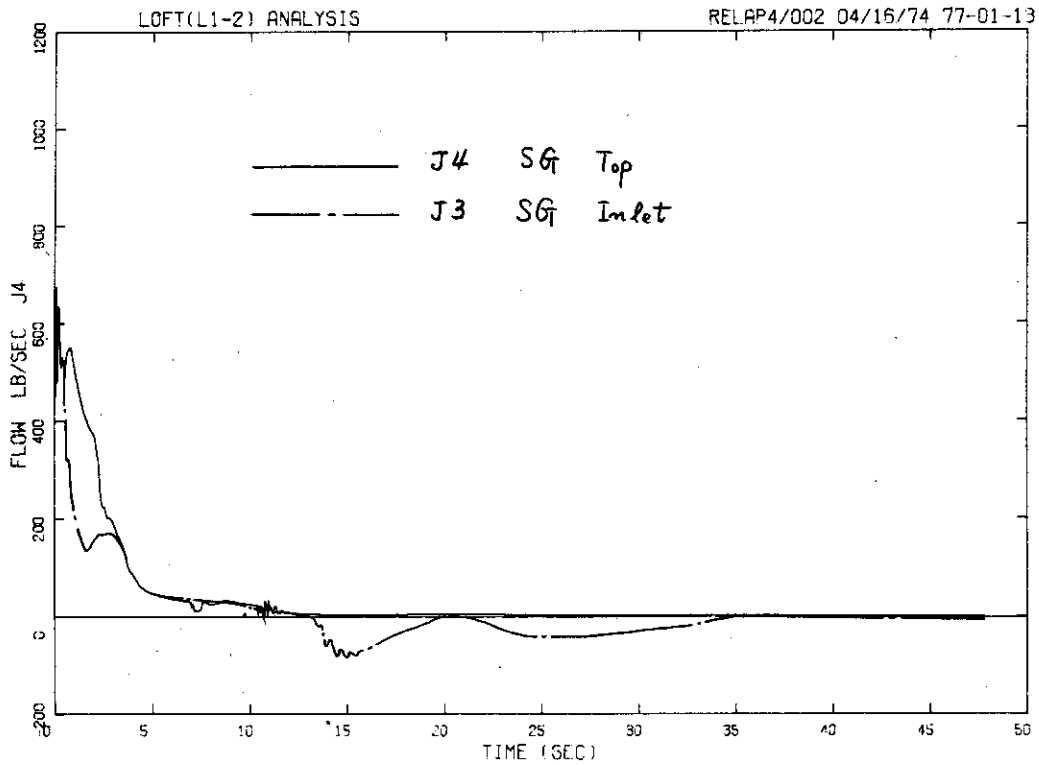


Fig. 4.40 Flow Balance in SG Inlet-Side Volume

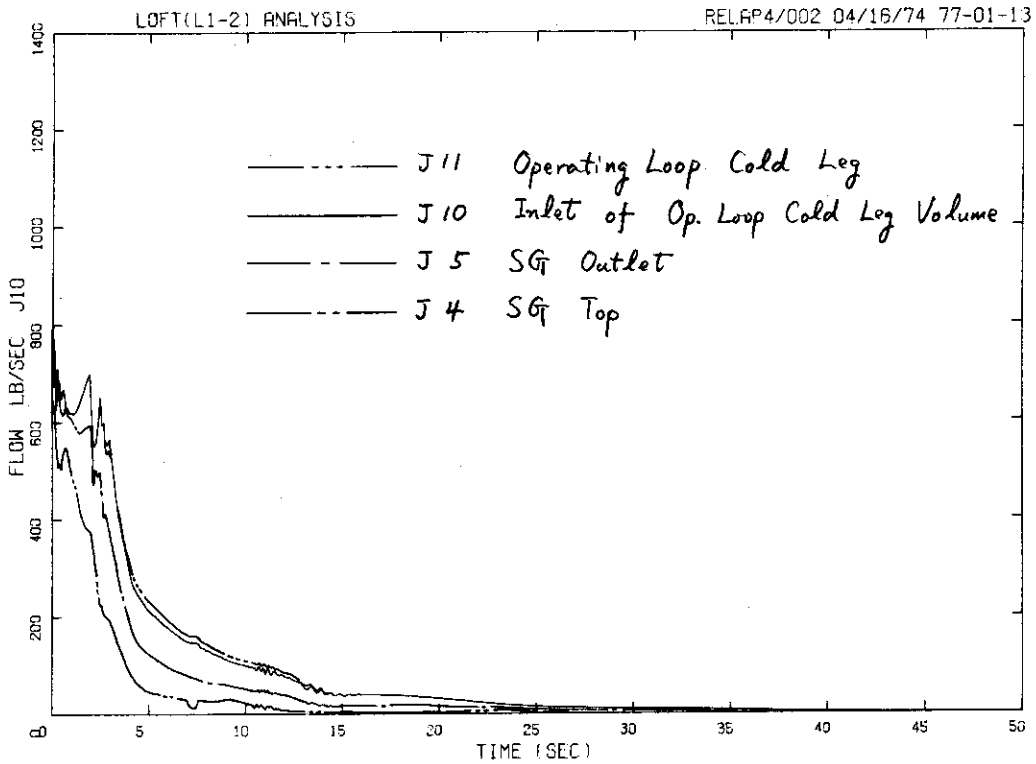


Fig. 4.41 Calculated Flows from Top of Steam Generator to Cold Leg of Operating Loop

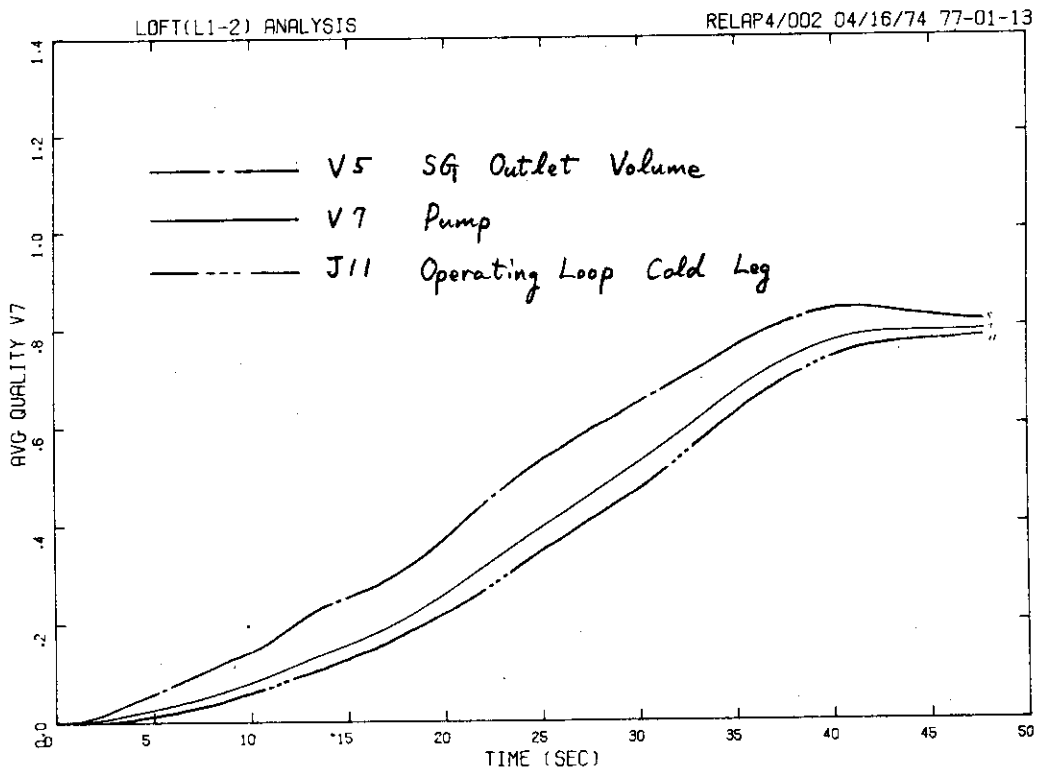


Fig. 4.42 Calculated Qualities of SG Outlet Volume, Pump and Cold Leg of Operating Loop

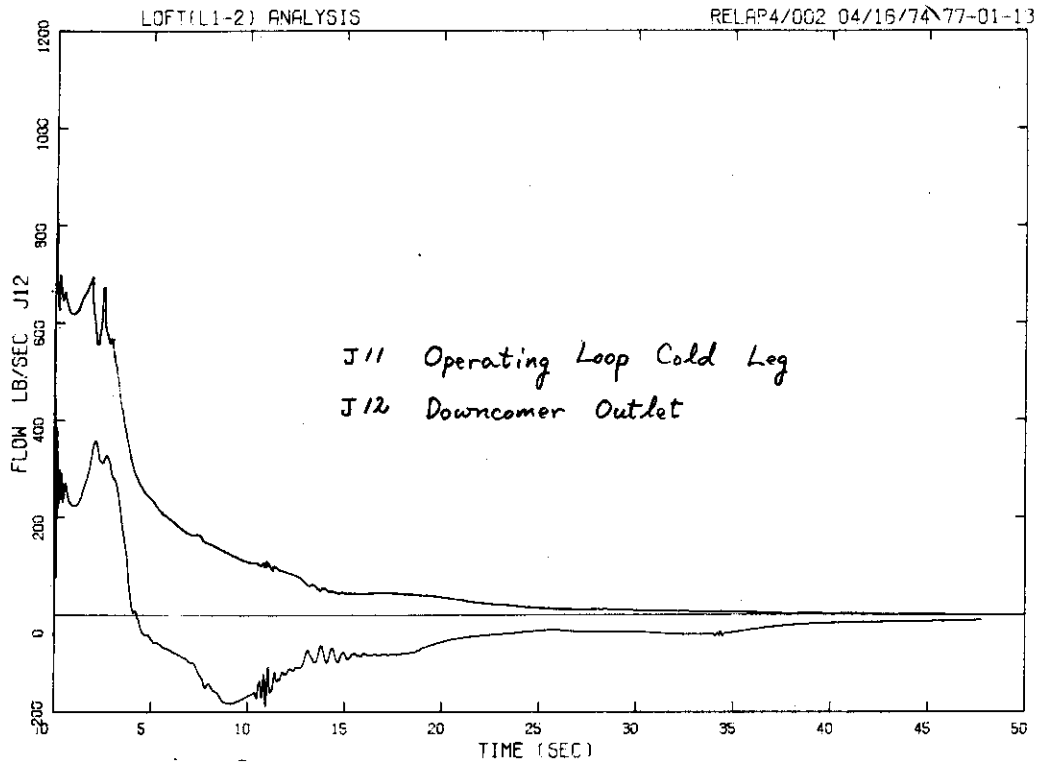


Fig. 4.43 Calculated Flows at Operating Loop Cold Leg and Downcomer Outlet.

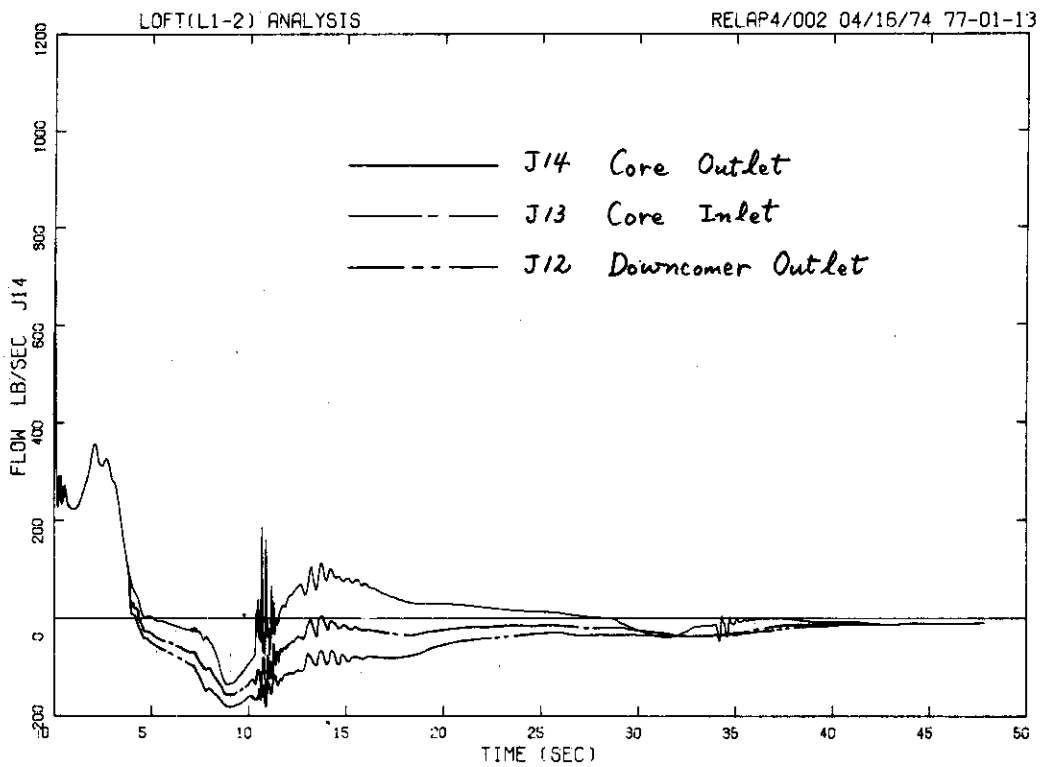


Fig. 4.44 Calculated Flows from Downcomer Outlet to Core Outlet

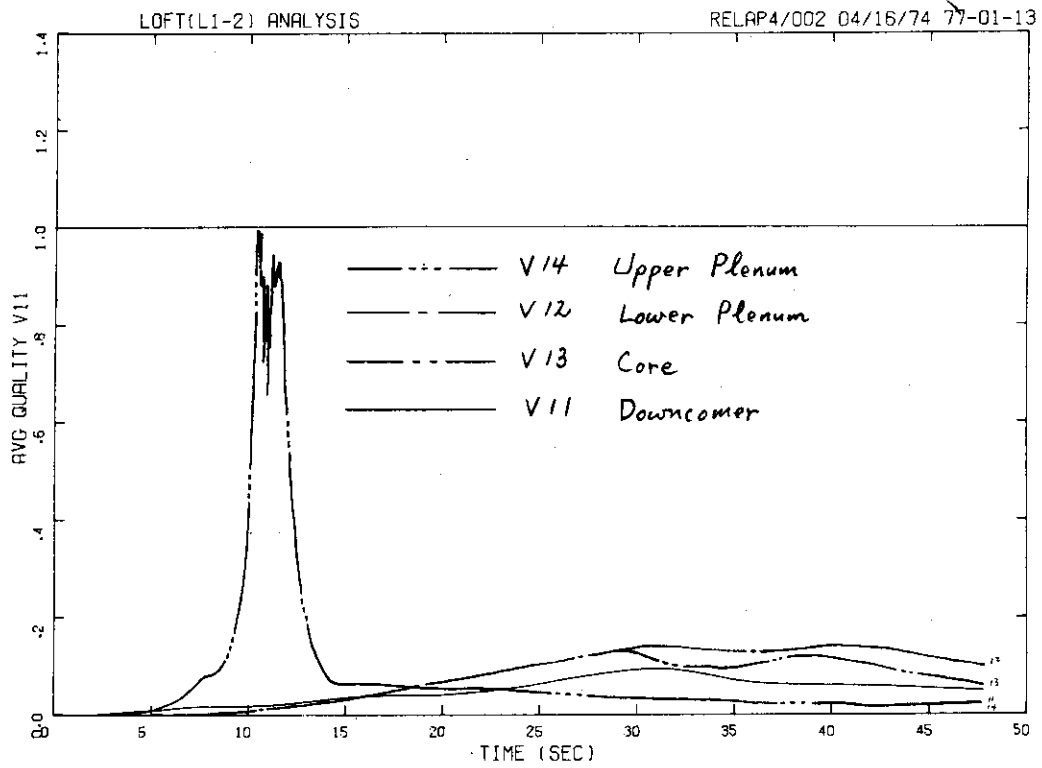


Fig. 4.45 Calculated Qualities at Downcomer, Lower Plenum, Core and Upper Plenum

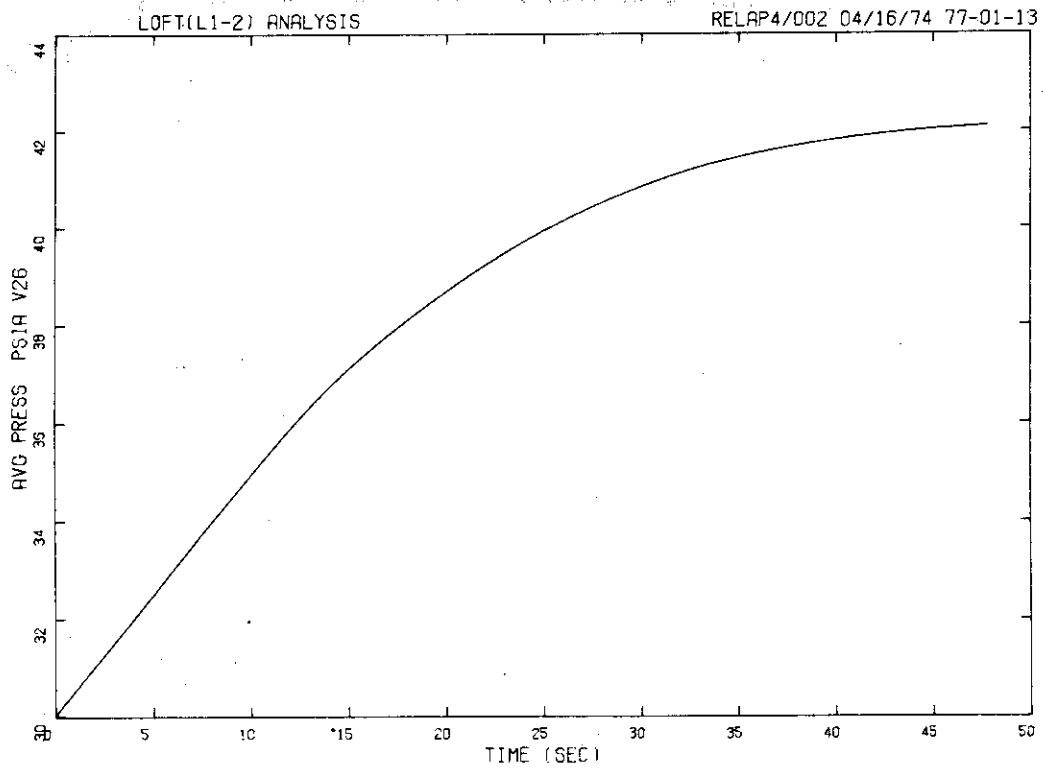


Fig. 4.46 Calculated Pressure Transient at Suppression Tank

COMPARISON OF L1-2 DATA AND RELAP4J ANALYSIS

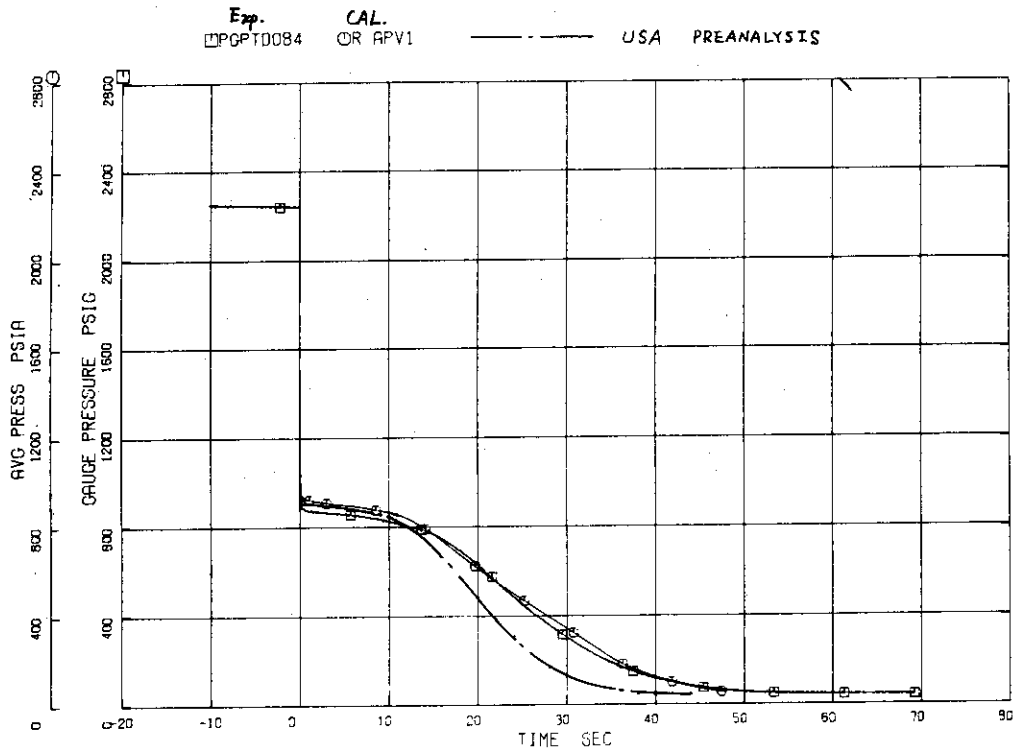


Fig. 4.47 Calculated pressure transient at operating loop hot leg is compared with experimental results.

COMPARISON OF L1-2 DATA AND RELAP4J ANALYSIS

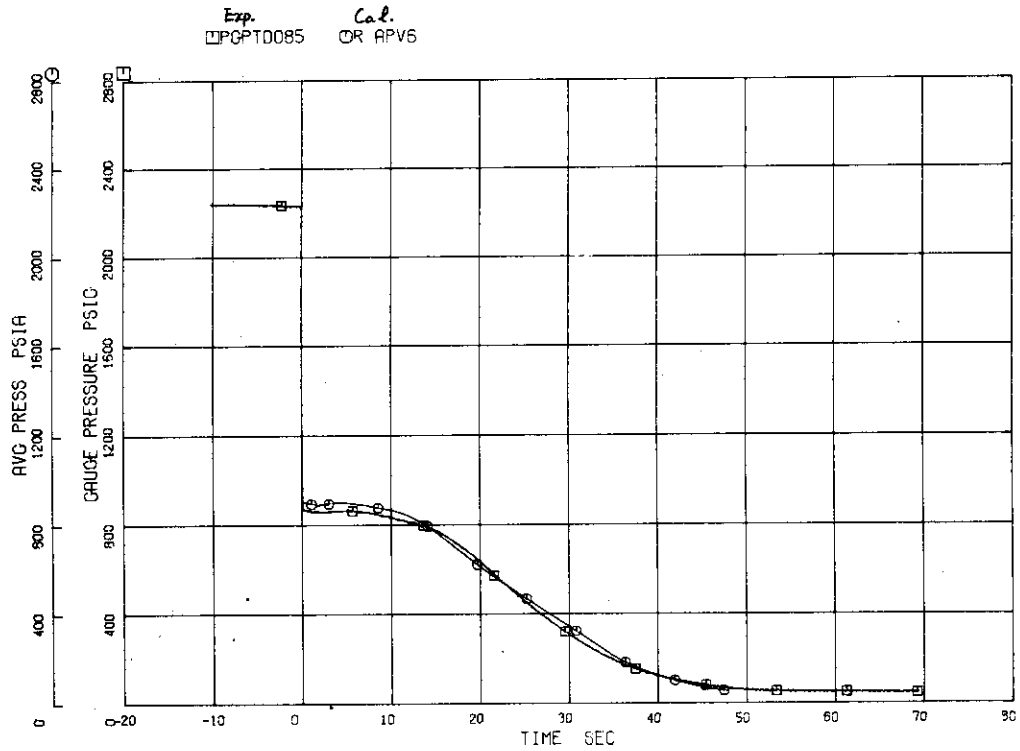


Fig. 4.48 Calculated pressure transient at pump inlet is compared with experimental results.



COMPARISON OF L1-2 DATA AND RELAP4J ANALYSIS

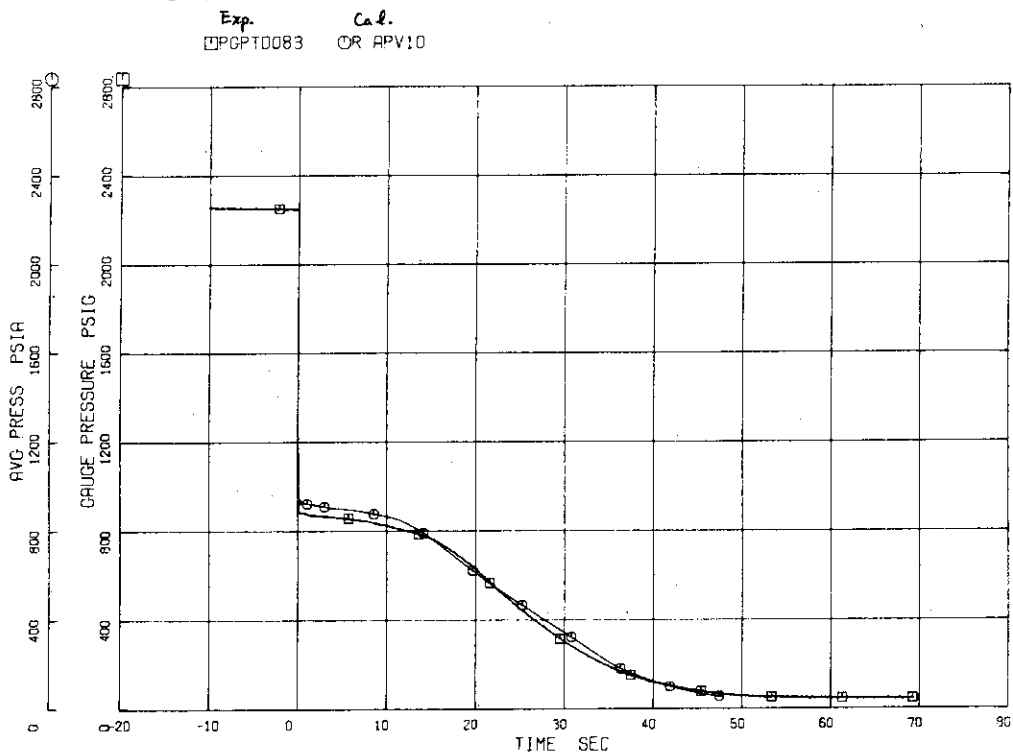


Fig. 4.49 Calculated pressure transient at operating loop cold leg is compared with experimental results.

COMPARISON OF L1-2 DATA AND RELAP4J ANALYSIS

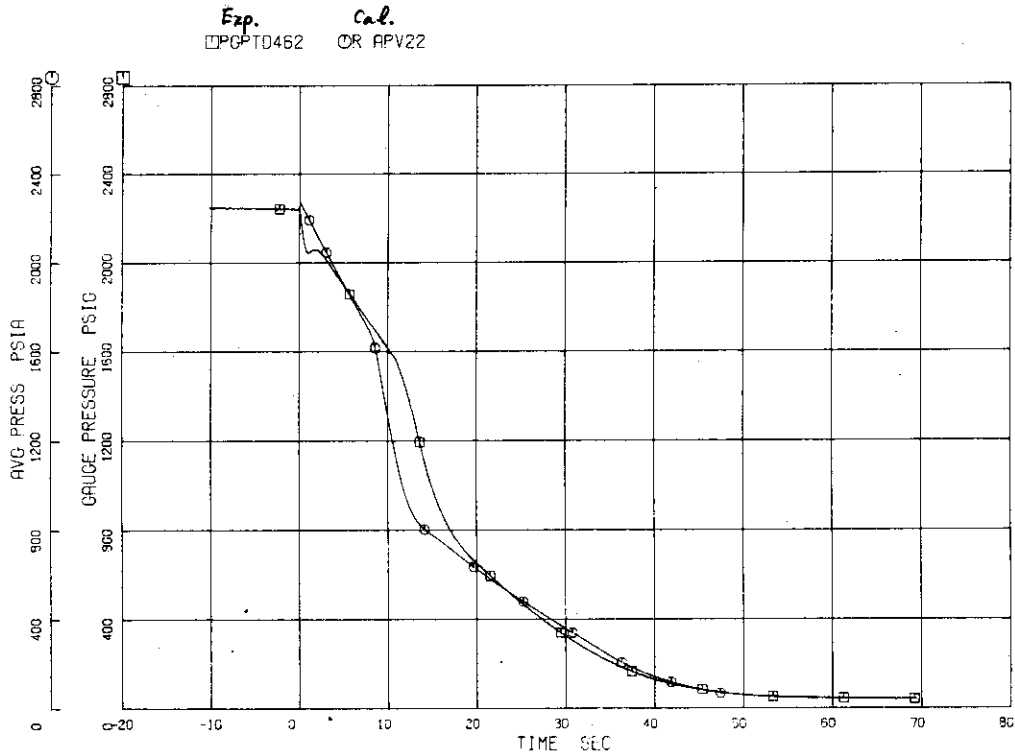


Fig. 4.50 Calculated pressure transient at pressurizer is compared with experimental results.

COMPARISON OF L1-2 DATA AND RELAP4J ANALYSIS

Exp. Cal.  
 □ PG8T0076    ○ OR APV15

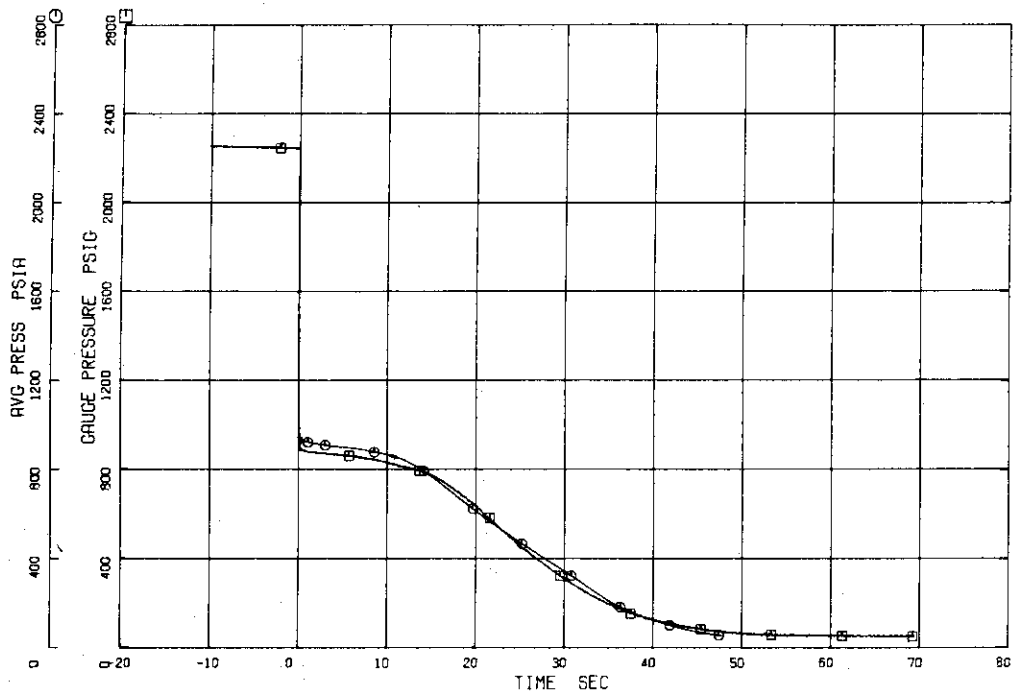


Fig. 4.51 Calculated pressure transient at blowdown loop hot leg is compared with experimental results.

COMPARISON OF L1-2 DATA AND RELAP4J ANALYSIS

Exp. Cal.  
 □ PG8T0079    ○ OR APV19

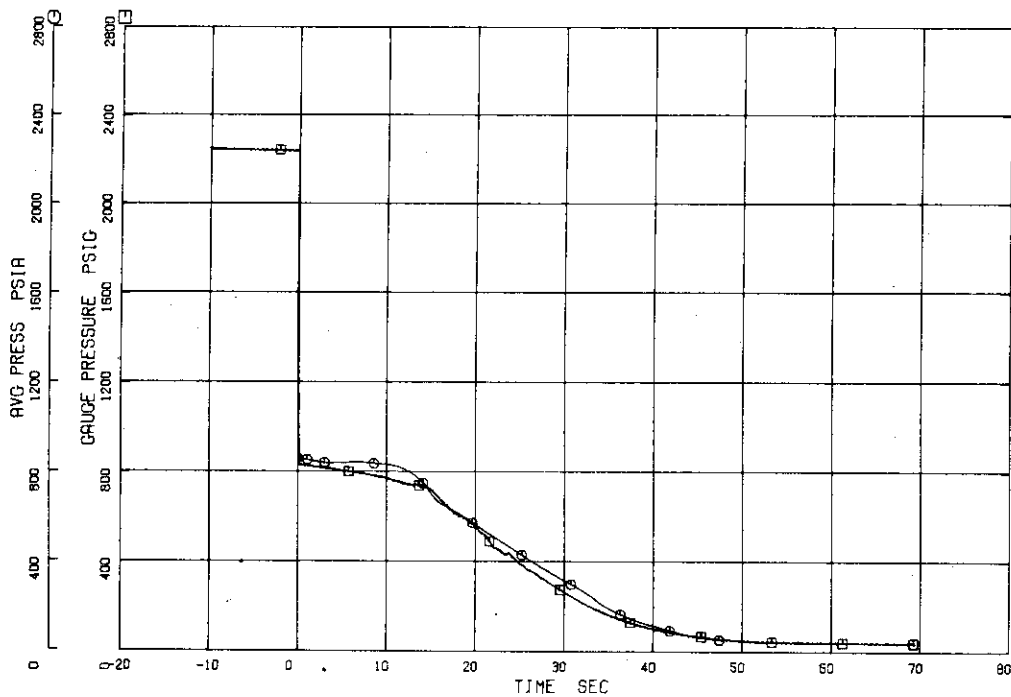


Fig. 4.52 Calculated pressure transient at pump simulator inlet is compared with experimental results.

COMPARISON OF L1-2 DATA AND RELAP4J ANALYSIS

Exp. Cal.  
 □ PGBT0075 ○ OR APV21

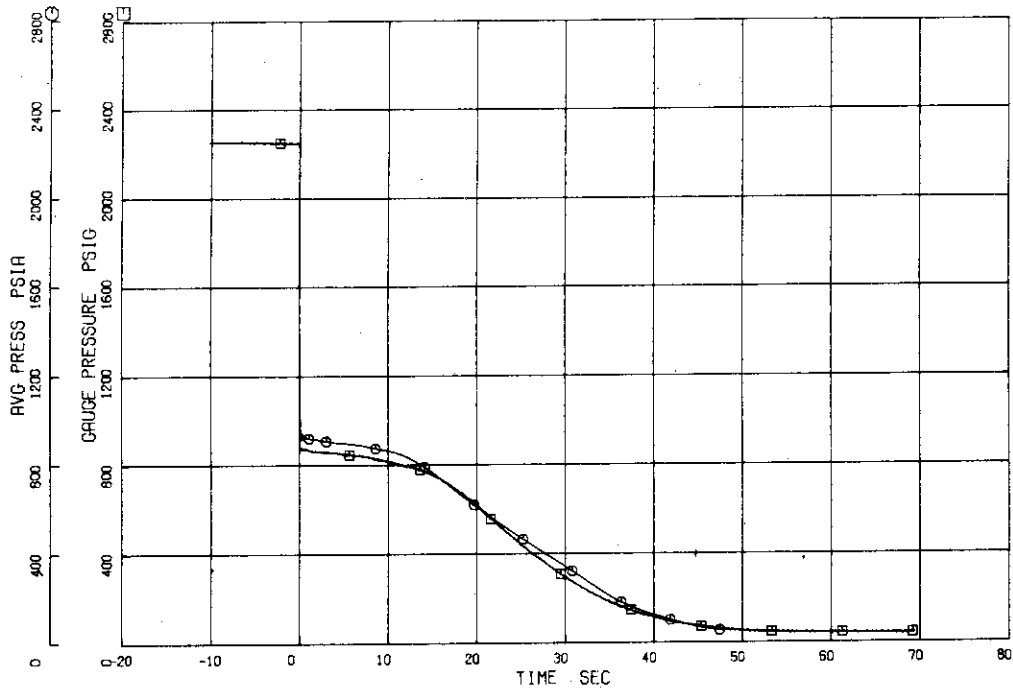


Fig. 4.53 Calculated pressure transient at blowdown loop cold leg is compared with experimental results.

COMPARISON OF L1-2 DATA AND RELAP4J ANALYSIS

Exp. Cal.  
 □ PGBT0078 ○ OR APV27

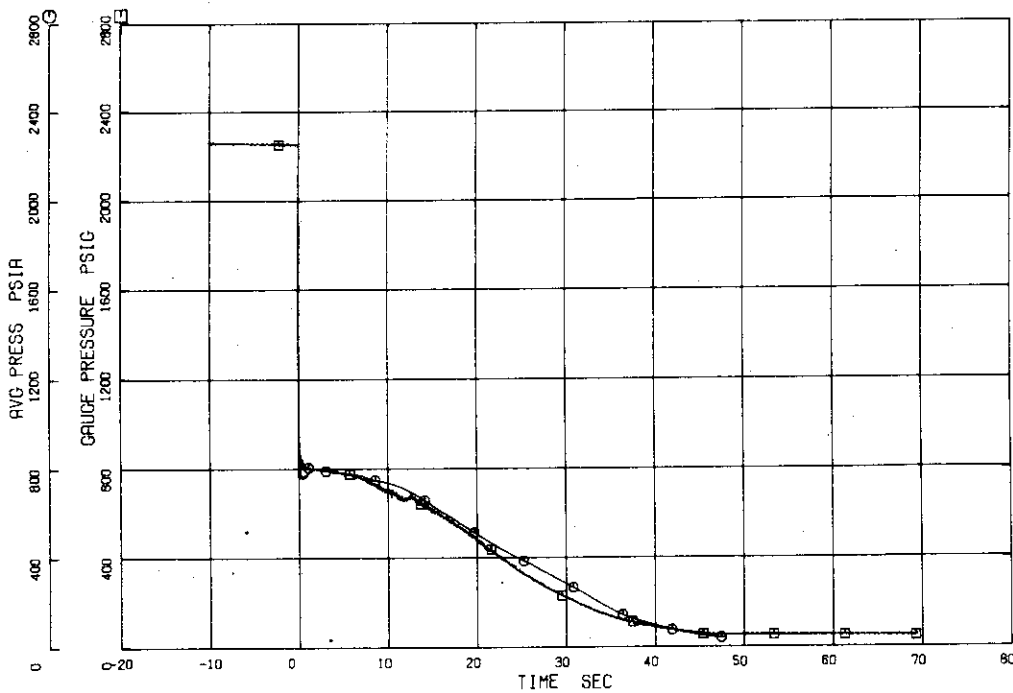


Fig. 4.54 Calculated pressure transient at nozzle of blowdown loop is compared with experimental results.

COMPARISON OF L1-2 DATA AND RELAP4J ANALYSIS

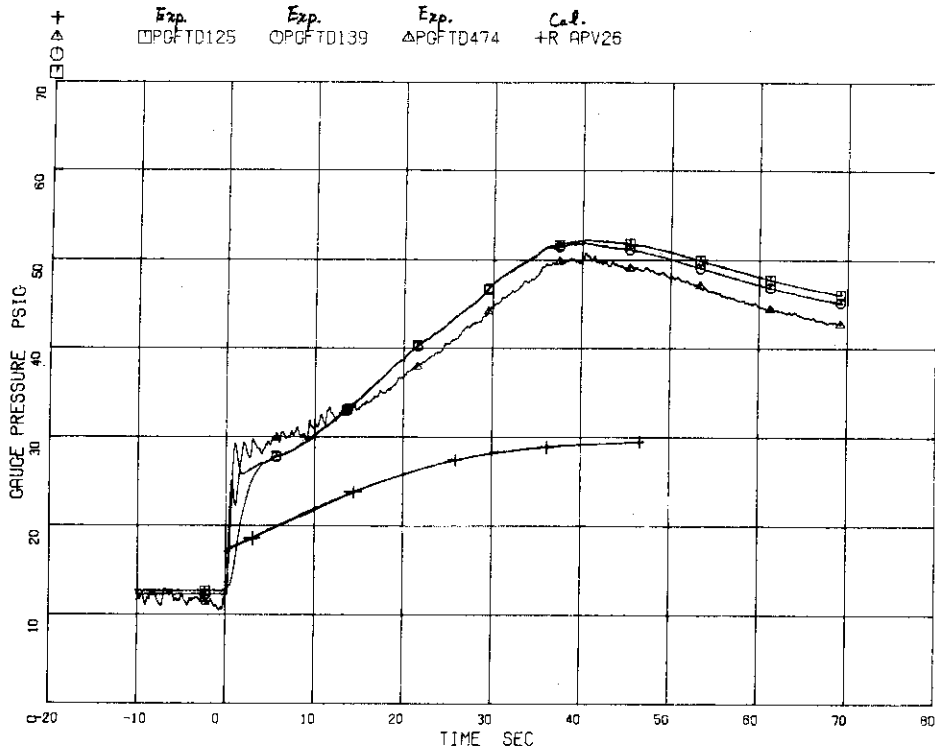


Fig. 4.55 Calculated pressure transient at suppression tank is compared with experimental results.

COMPARISON OF L1-2 DATA AND RELAP4J ANALYSIS

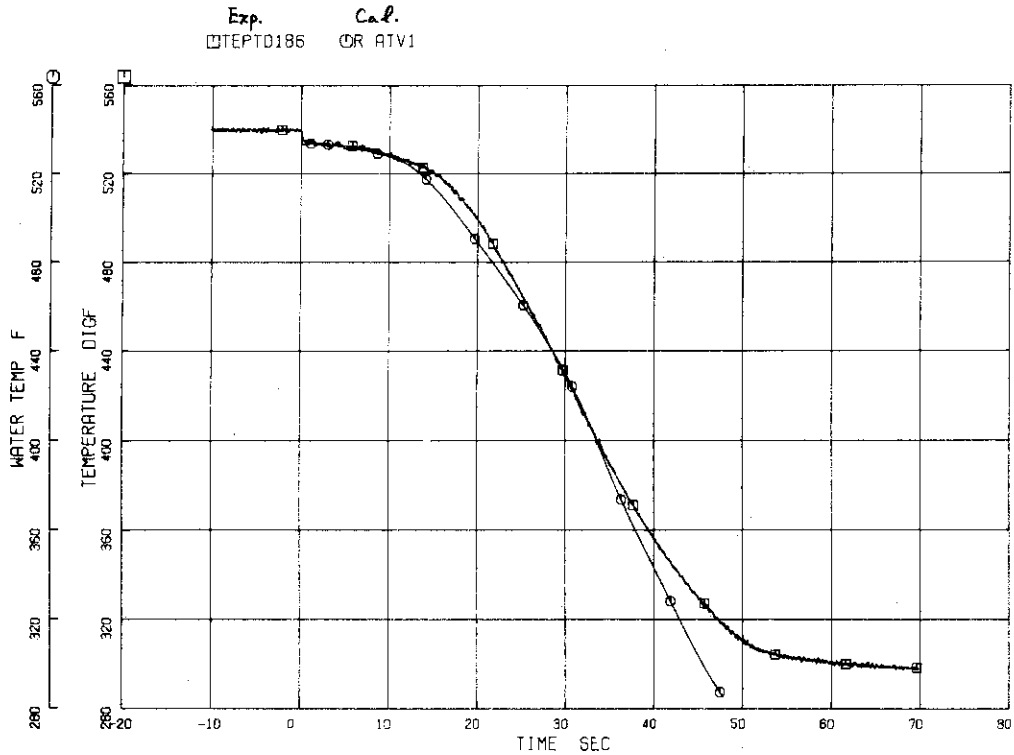


Fig. 4.56 Calculated fluid temperature transient at operating loop hot leg is compared with experiment.

COMPARISON OF L1-2 DATA AND RELAP4J ANALYSIS

Exp. Cal.  
 □ TEPTD185 ○ OR ATV10

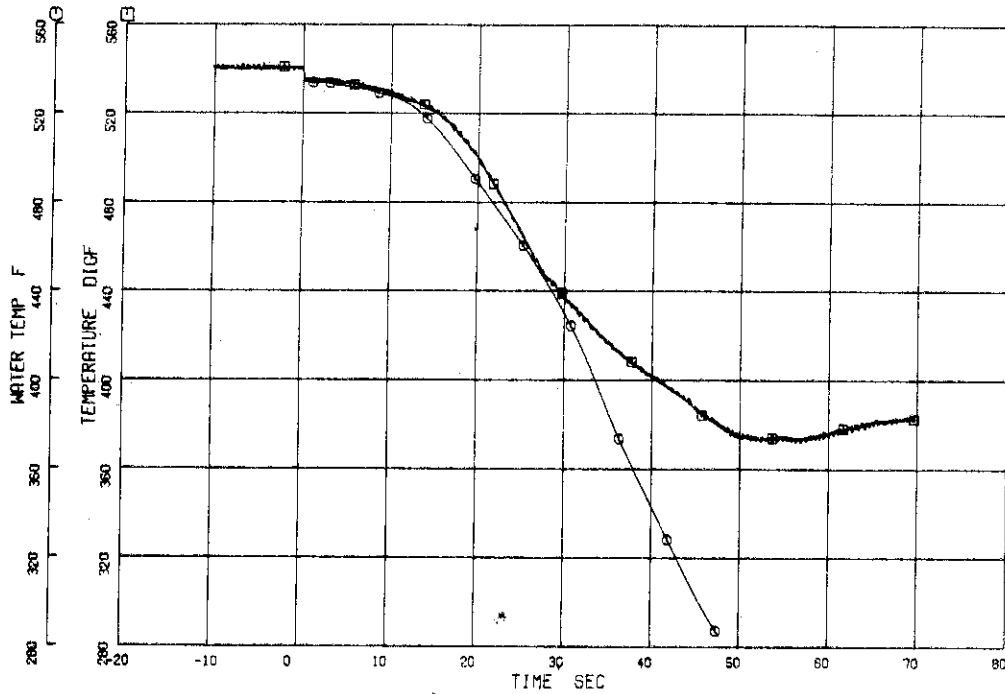


Fig. 4.57 Calculated fluid temperature transient at operating loop cold leg is compared with experiment.

COMPARISON OF L1-2 DATA AND RELAP4J ANALYSIS

Exp. Cal.  
 □ TEBTD179 ○ OR ATV15

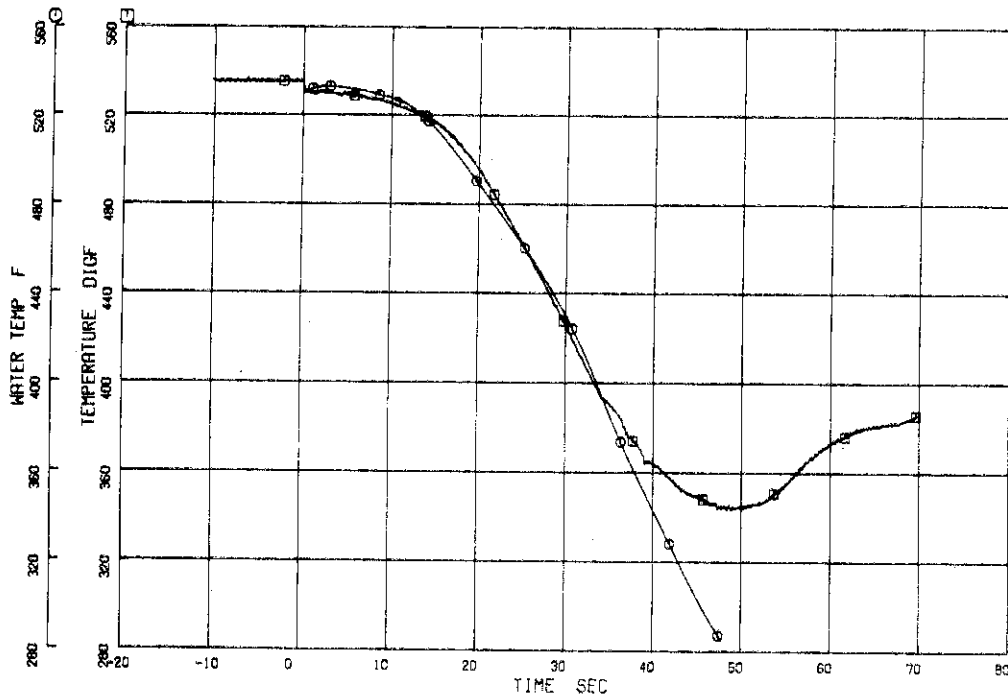


Fig. 4.58 Calculated fluid temperature transient at blowdown loop hot leg is compared with experiment.

COMPARISON OF L1-2 DATA AND RELAP4J ANALYSIS

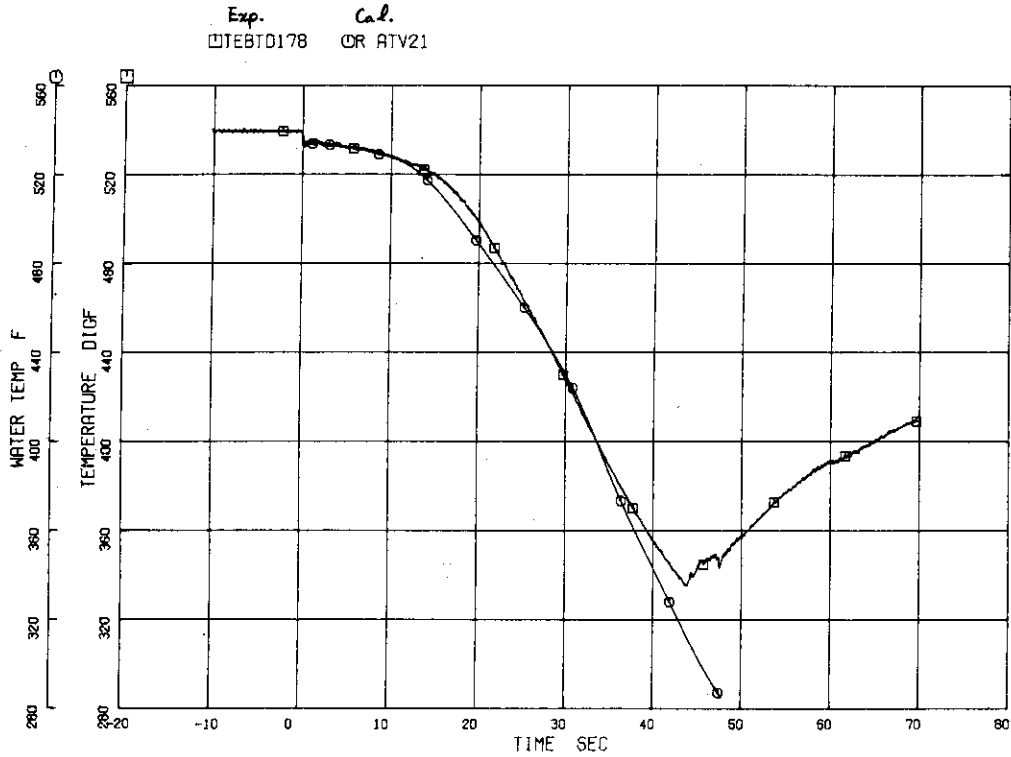


Fig. 4.59 Calculated fluid temperature transient at blowdown loop cold leg is compared with experiment.

COMPARISON OF L1-2 DATA AND RELAP4J ANALYSIS

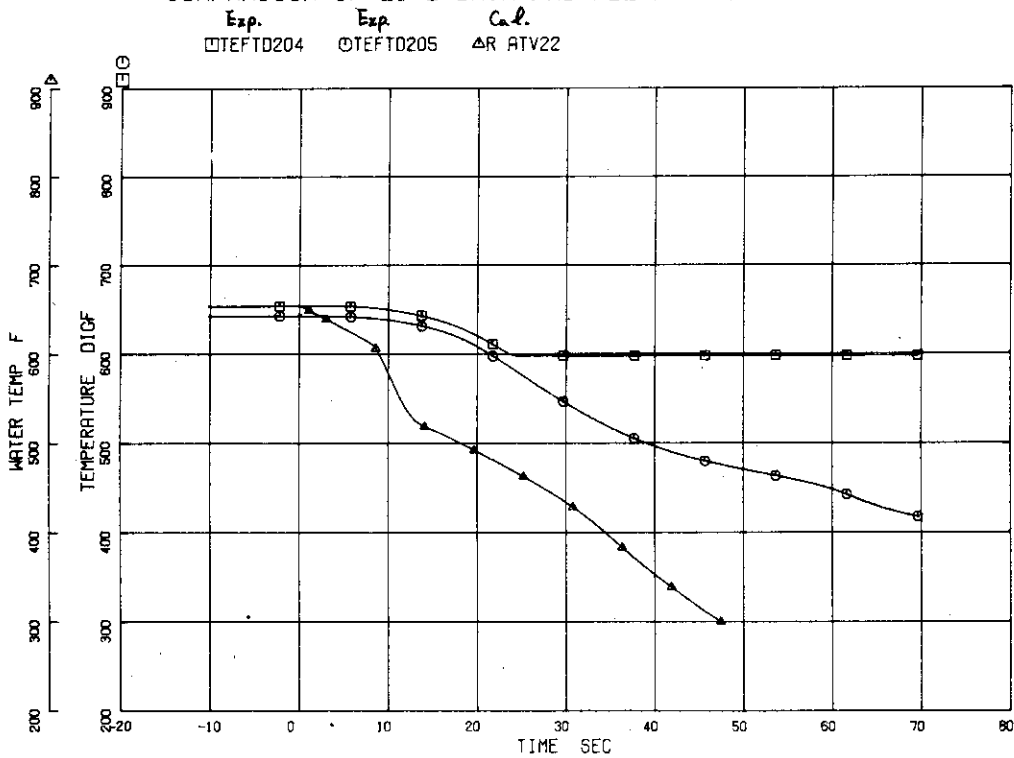


Fig. 4.60 Calculated temperature transient in pressurizer is compared with experiment.

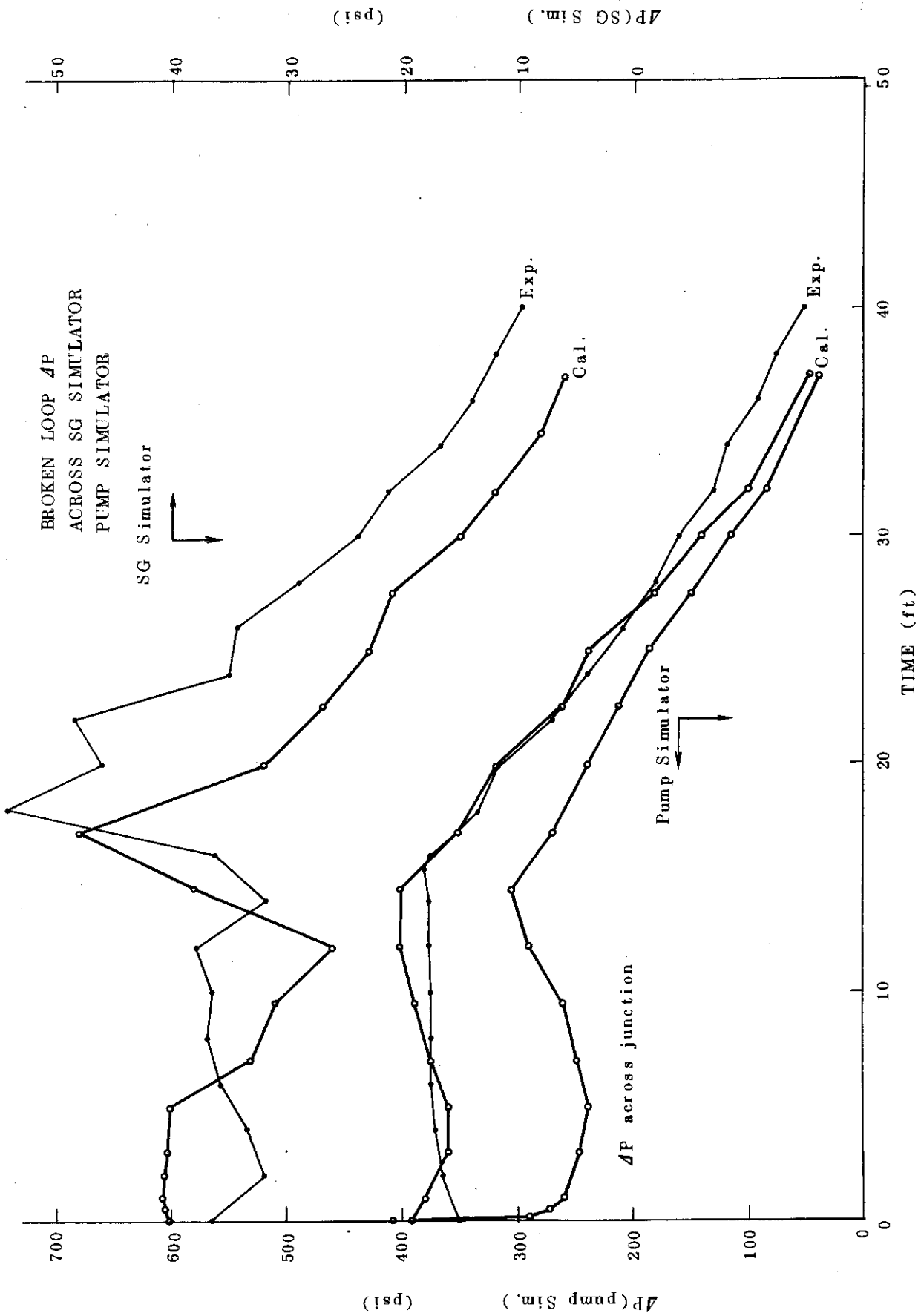


Fig. 4.61 Calculated pressure losses at SG and pump simulators are compared with experiment.

COMPARISON OF L1-2 DATA AND RELAP4J ANALYSIS

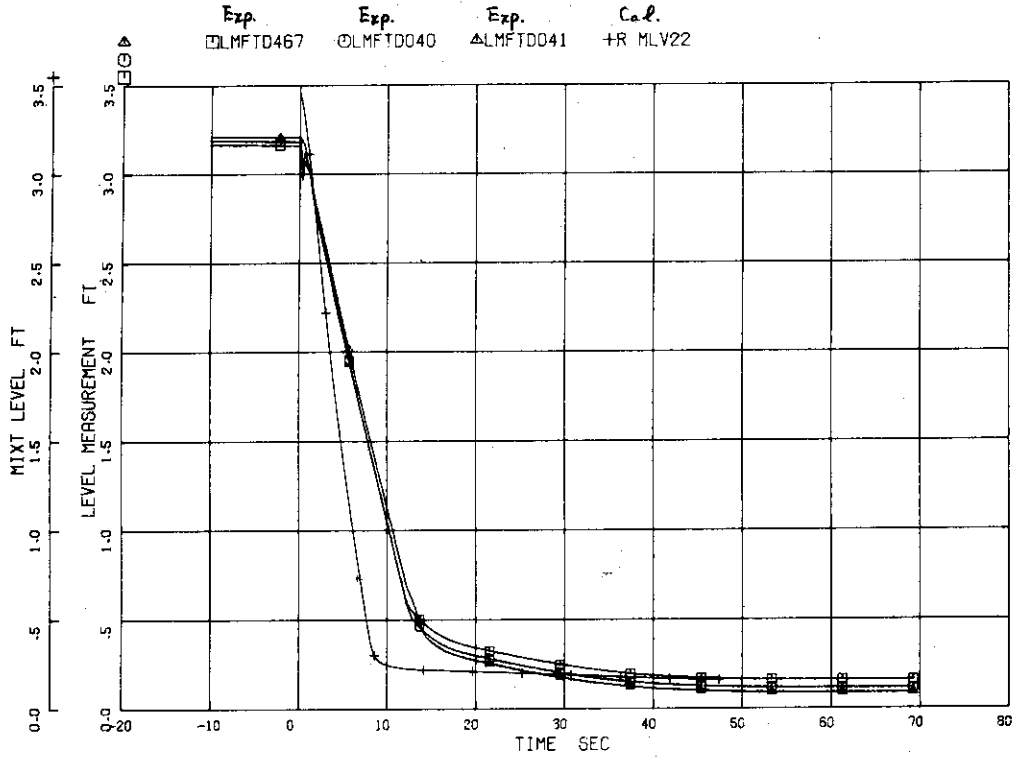


Fig. 4.62 Calculated mixture level transient in pressurizer is compared with experiment.

COMPARISON OF L1-2 DATA AND RELAP4J ANALYSIS

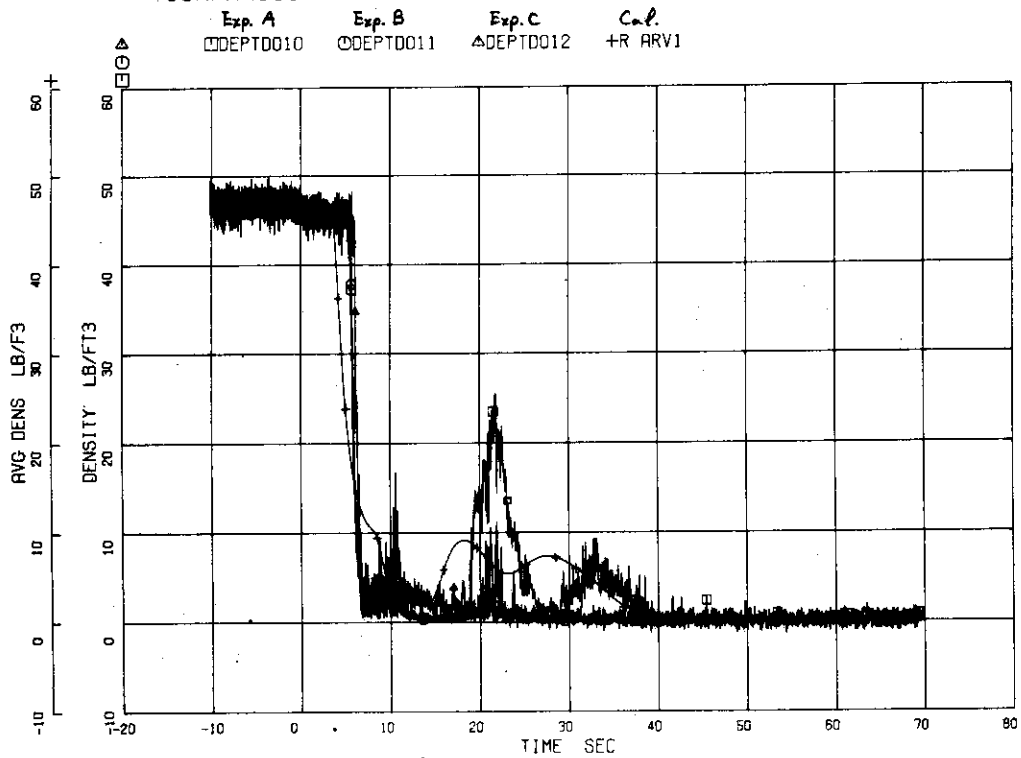


Fig. 4.63 Calculated density at operating loop hot leg is compared with experiment.



COMPARISON OF L1-2 DATA AND RELAP4J ANALYSIS

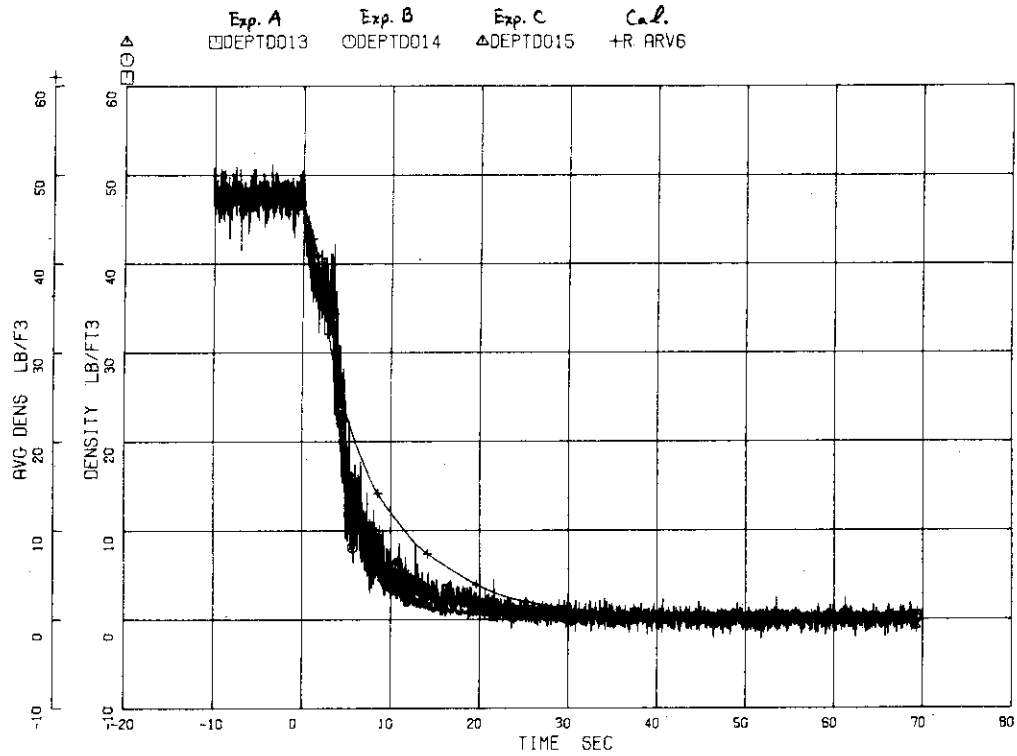


Fig. 4.64 Calculated density at operating loop pump inlet is compared with experiment.

COMPARISON OF L1-2 DATA AND RELAP4J ANALYSIS

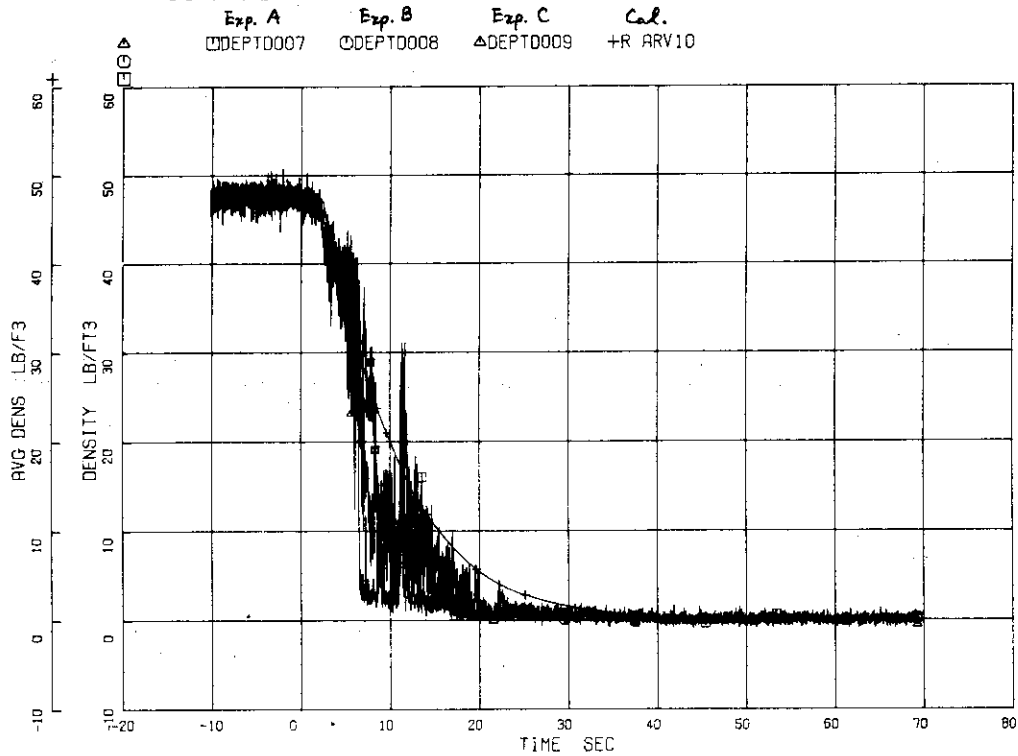


Fig. 4.65 Calculated density at operating loop cold leg is compared with experiment.

COMPARISON OF L1-2 DATA AND RELAP4J ANALYSIS

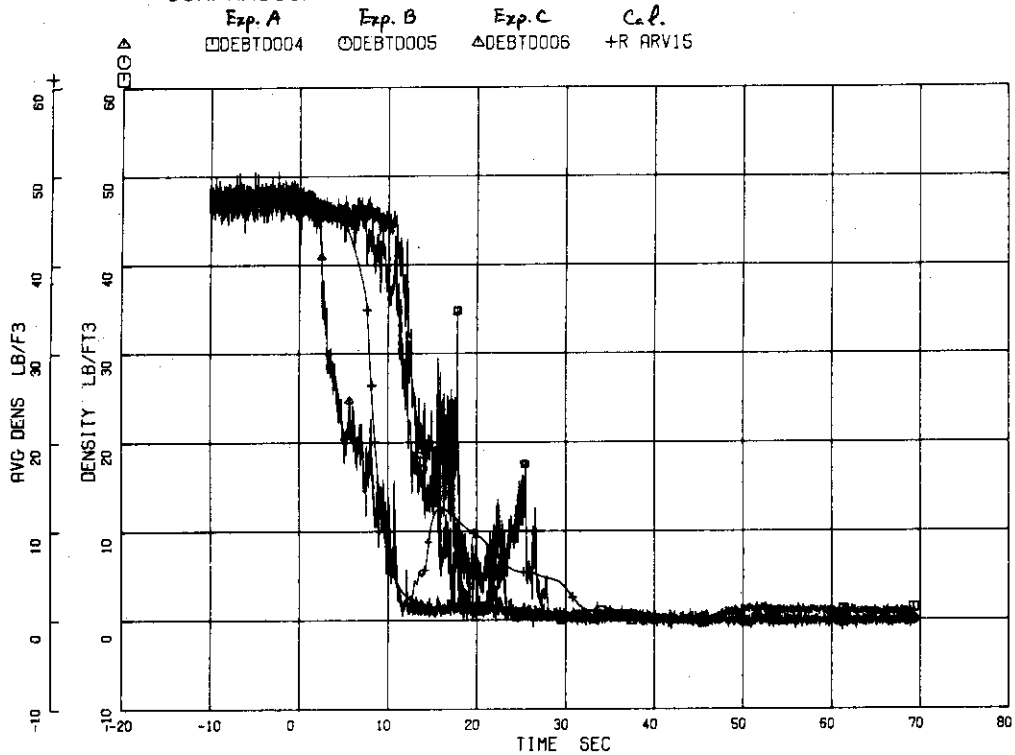


Fig. 4.66 Calculated density at blowdown loop hot leg is compared with experiment.

COMPARISON OF L1-2 DATA AND RELAP4J ANALYSIS

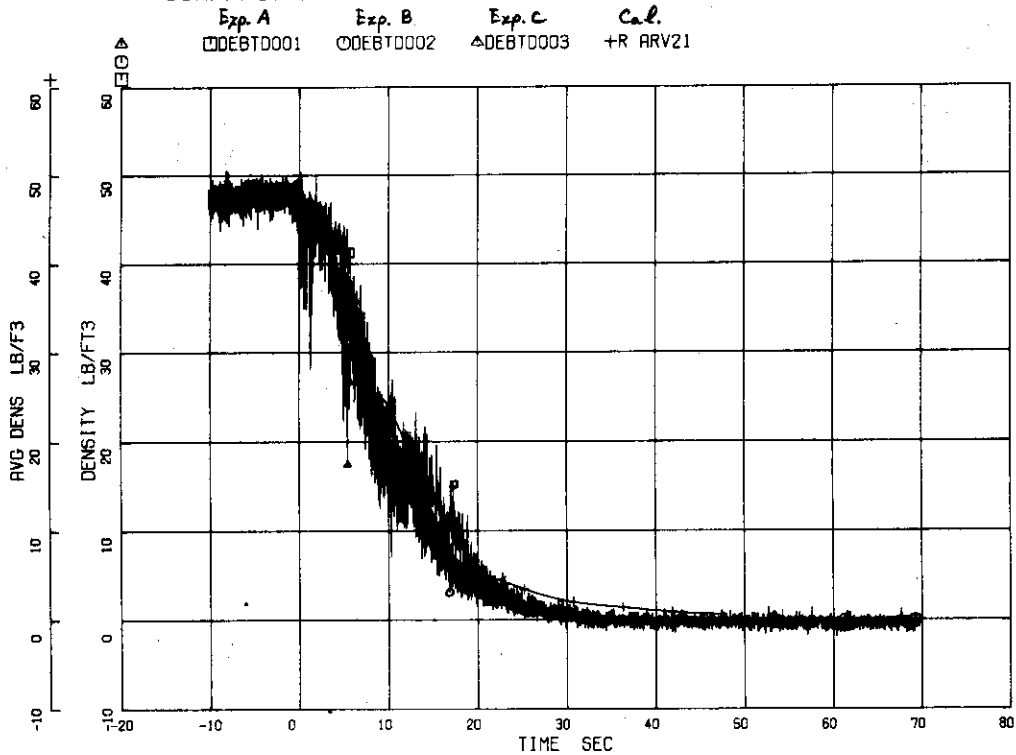


Fig. 4.67 Calculated density at blowdown loop cold leg is compared with experiment.

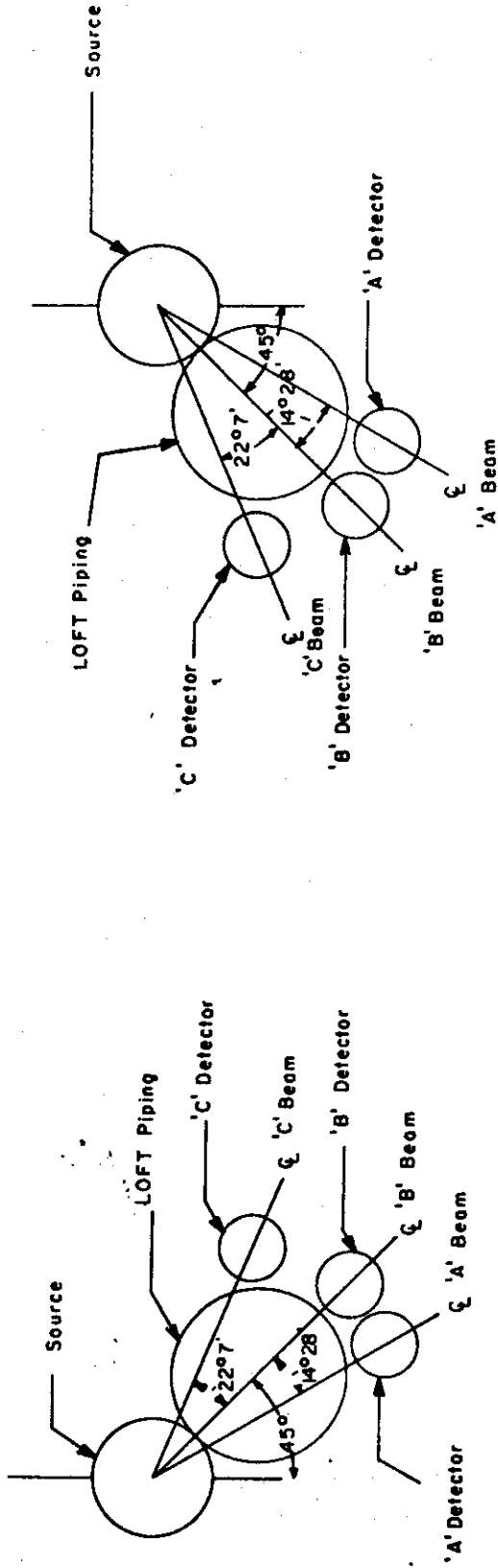


Fig. 4.68a RELATION OF SOURCE AND DETECTOR TO PIPE IN DE-BL-1, AND DE-PC-1 (VIEW LOOKING TOWARD REACTOR VESSEL)

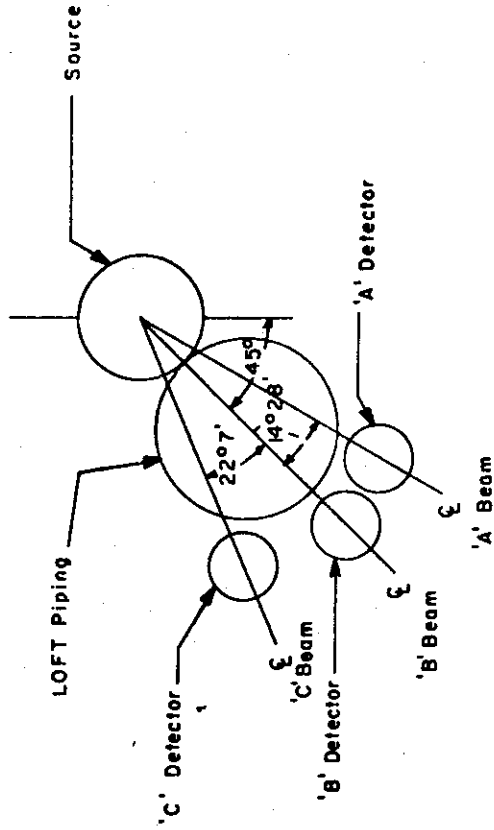


Fig. 4.68b RELATION OF SOURCE AND DETECTOR TO PIPE IN DE-BL-2, AND DE-PC-2 (VIEW LOOKING TOWARD REACTOR VESSEL)

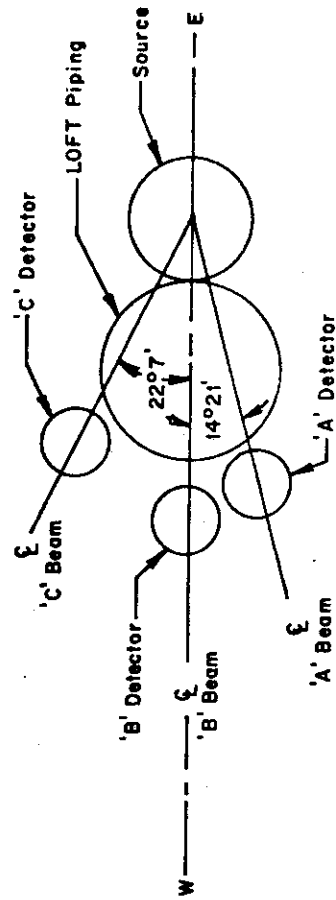


Fig. 4.68c RELATION OF SOURCE AND DETECTOR TO PIPE IN DE-PC-3 (VIEW LOOKING DOWN)

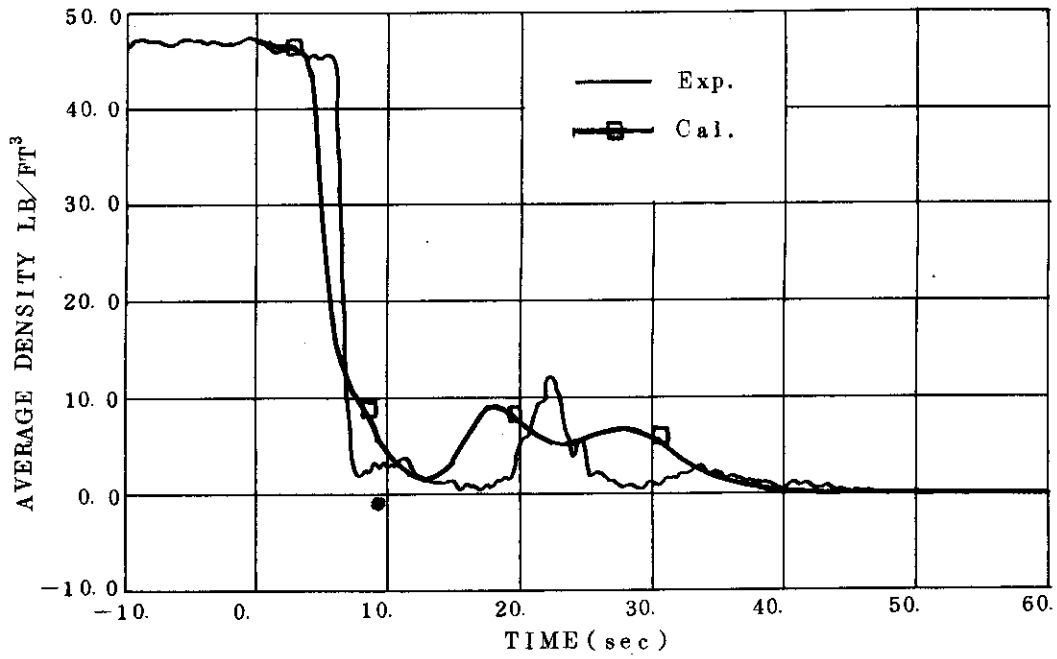


Fig. 4.69 Comparison of Experiment and Analysis of Average Density at Operating Loop Hot Leg

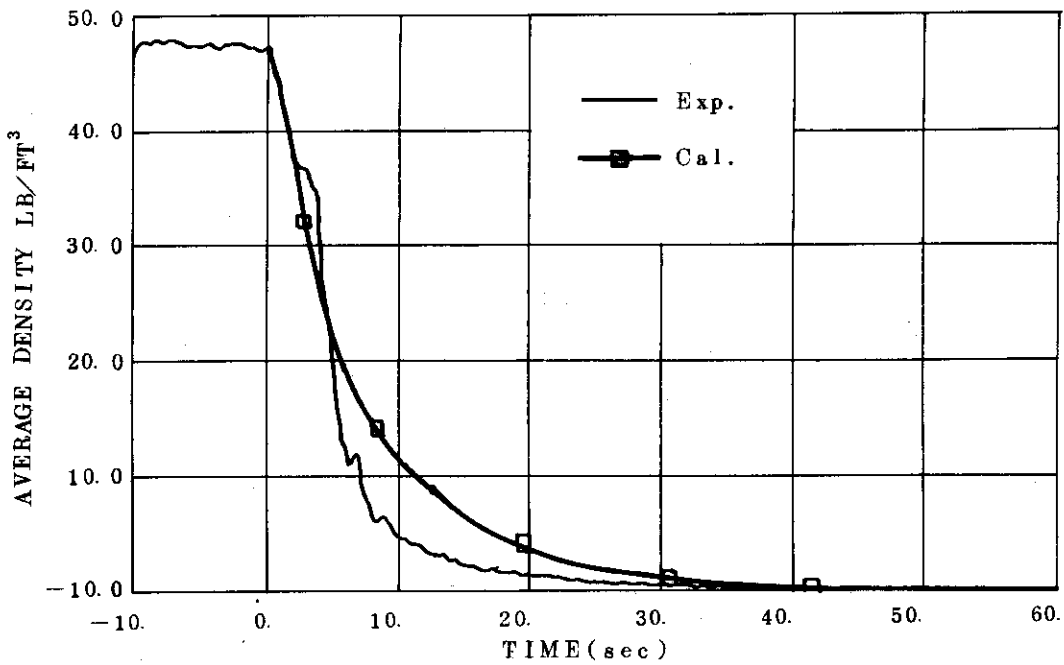


Fig. 4.70 Comparison of Experiment and Analysis of Average Density at Operating Loop SG Outlet

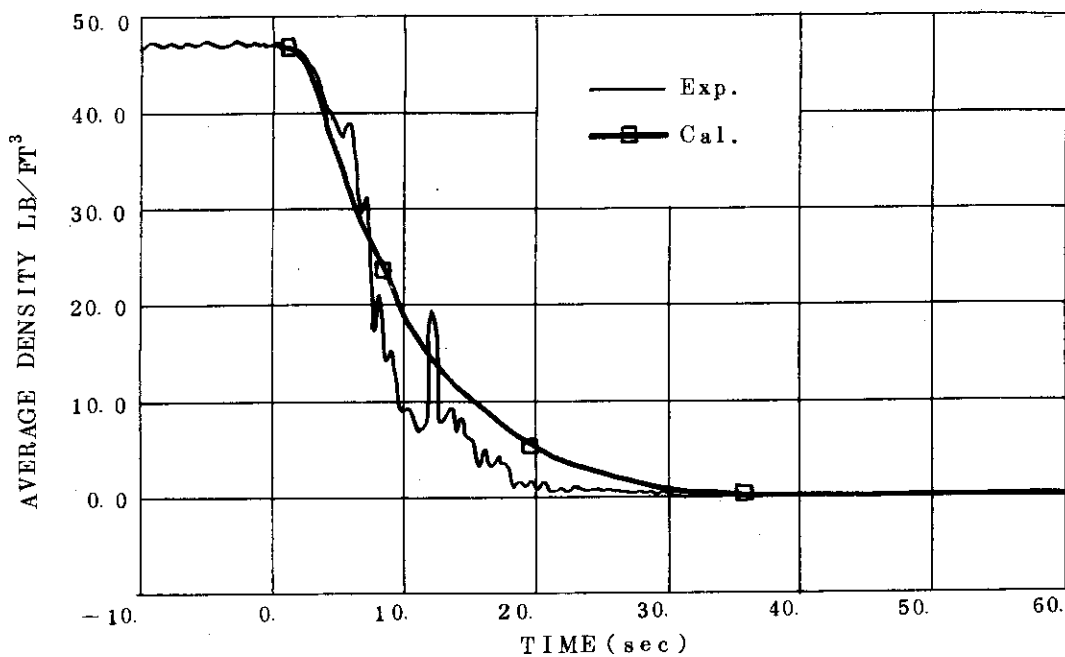


Fig. 4.71 Comparison of Experiment and Analysis of Average Density at Operating Loop Cold Leg

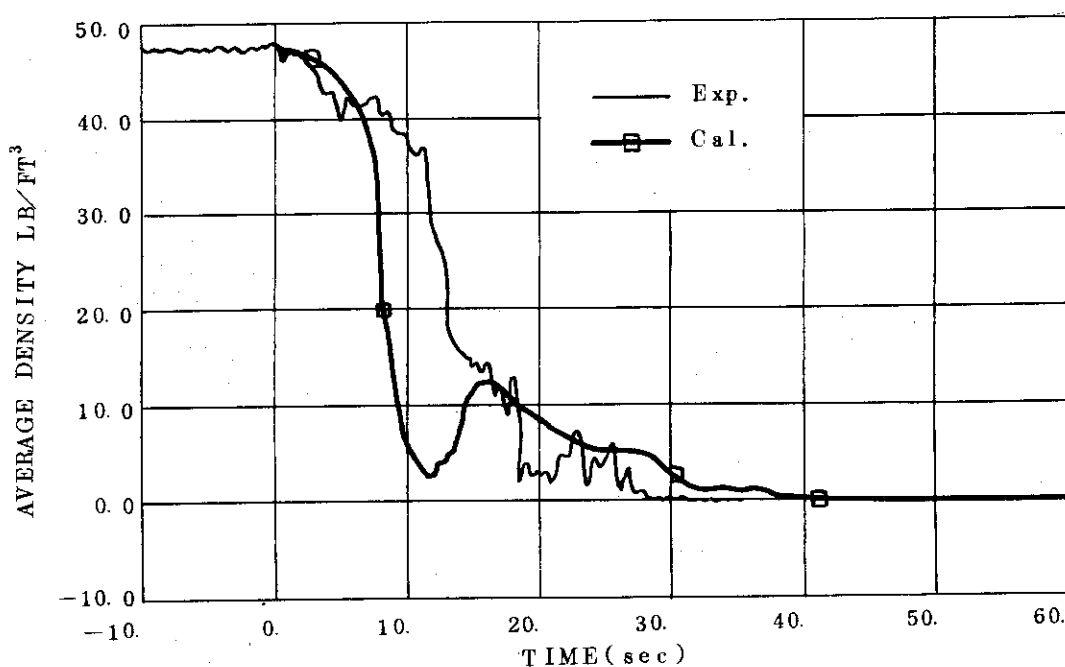


Fig. 4.72 Comparison of Experiment and Analysis of Average Density at Blowdown Loop Hot Leg

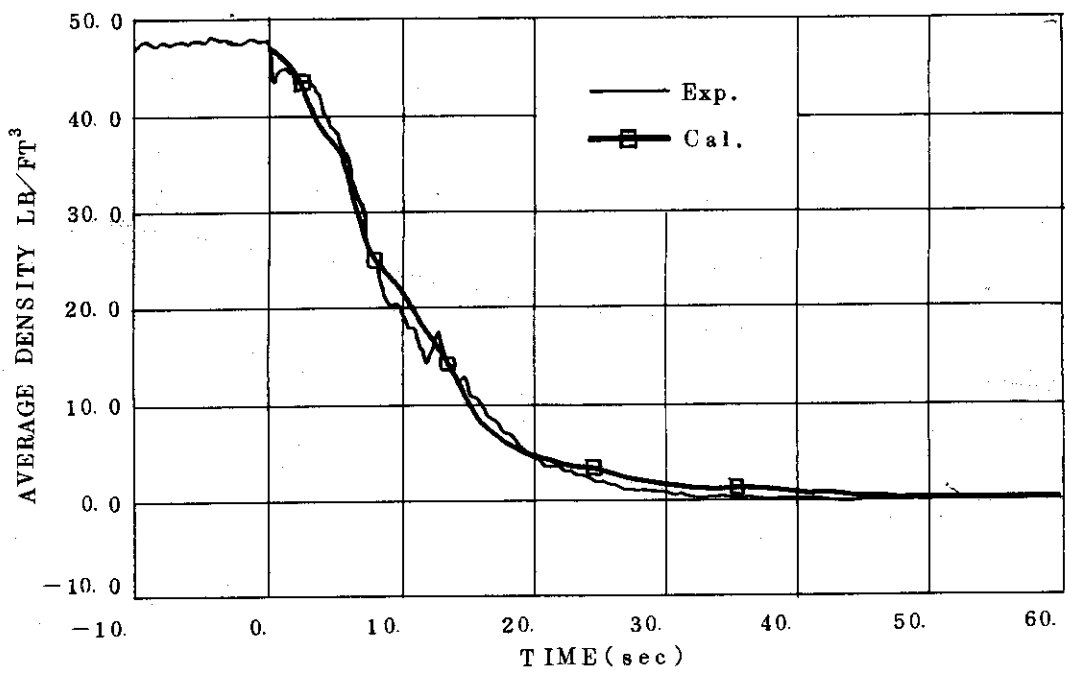


Fig. 4.73 Comparison of Experiment and Analysis of Average Density at Blowdown Loop Cold Leg

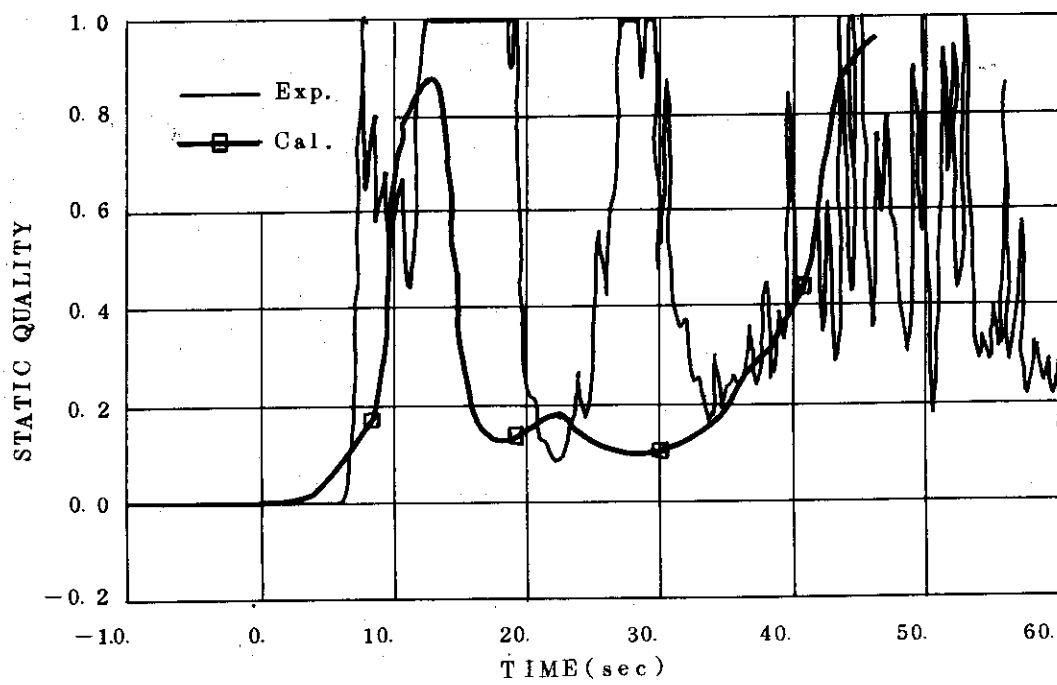


Fig. 4.74 Comparison of Experiment and Analysis of Static Quality at Operating Loop Hot Leg

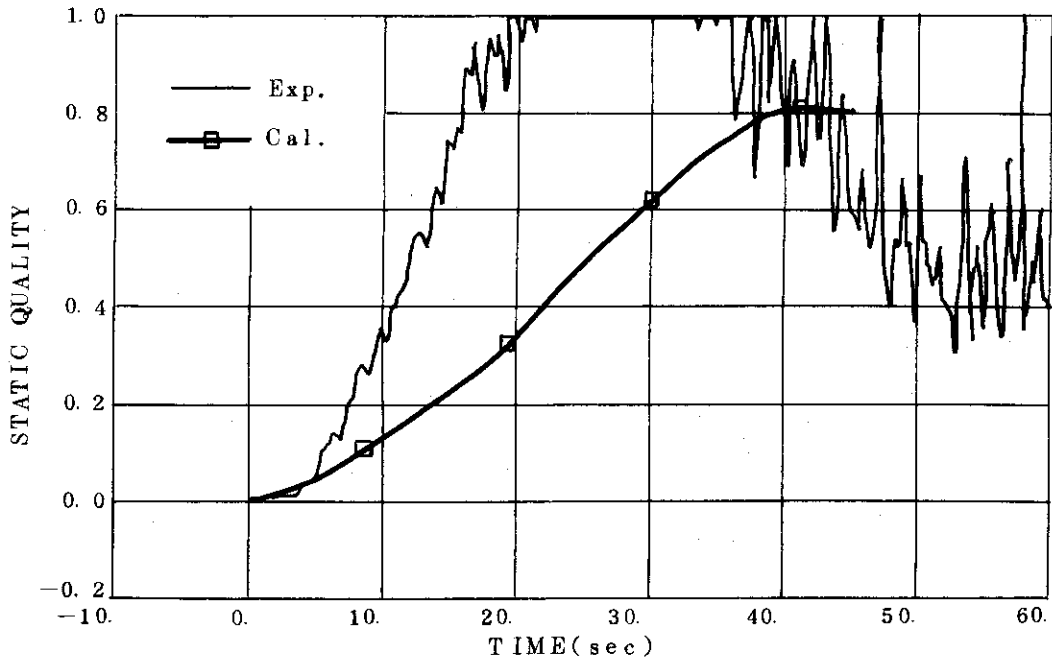


Fig. 4.75 Comparison of Experiment and Analysis of Static Quality at Operating Loop SG Outlet

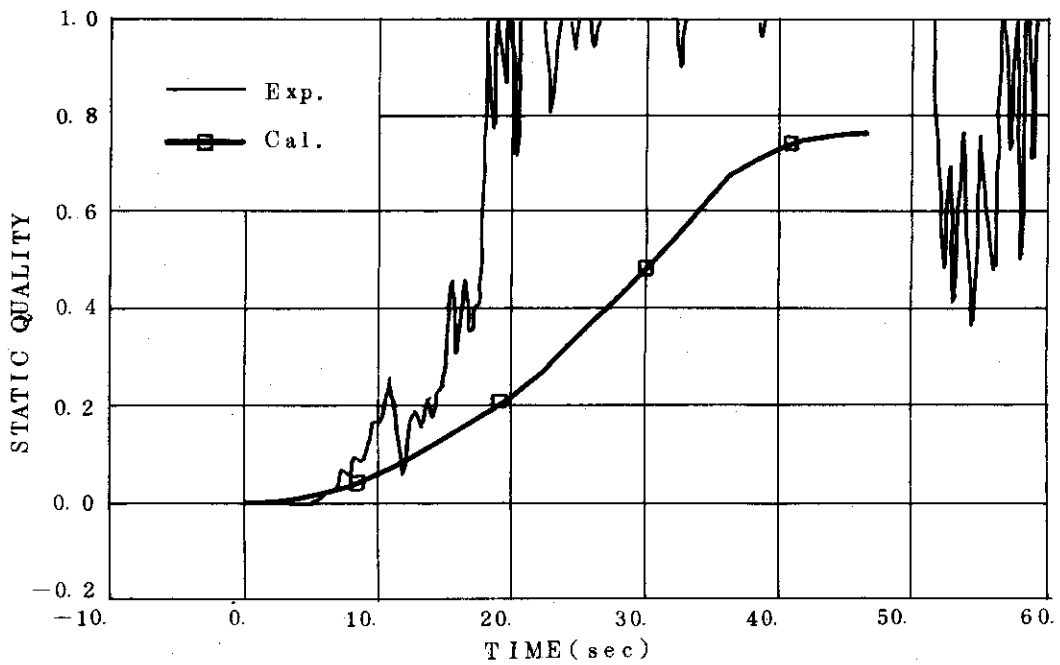


Fig. 4.76 Comparison of Experiment and Analysis of Static Quality at Operating Loop Cold Leg

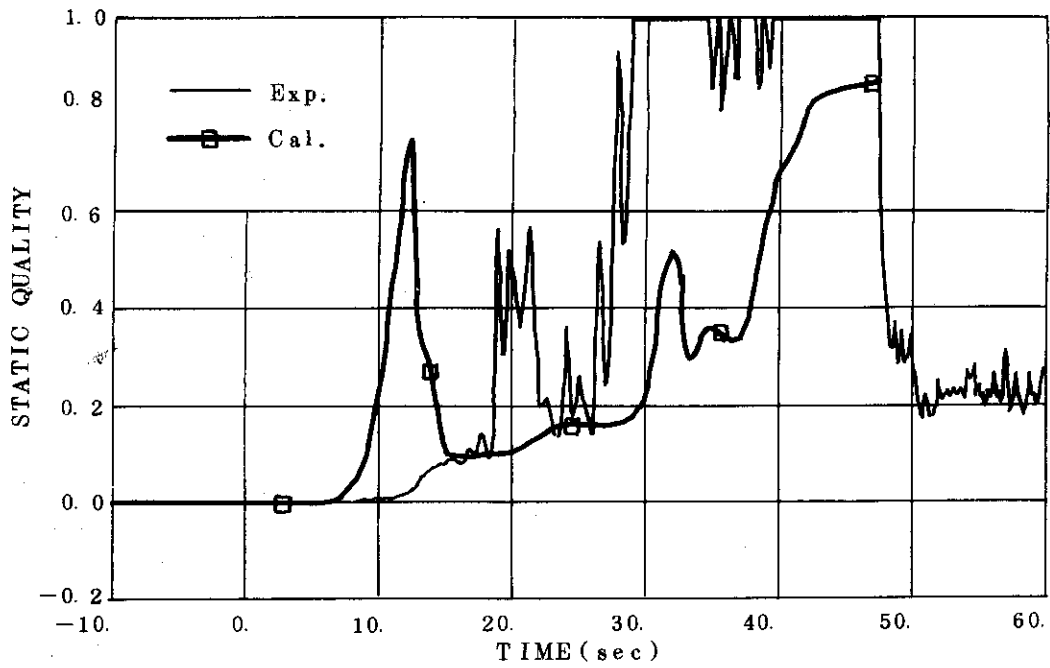


Fig. 4.77 Comparison of Experiment and Analysis of Static Quality at Blowdown Loop Hot Leg

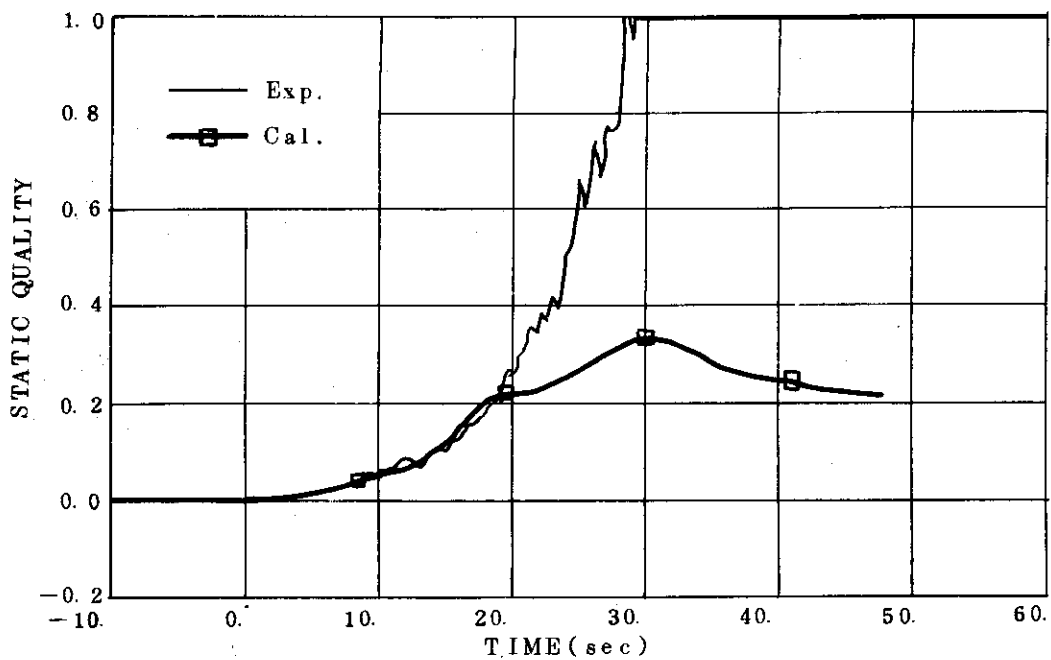


Fig. 4.78 Comparison of Experiment and Analysis of Static Quality at Blowdown Loop Cold Leg



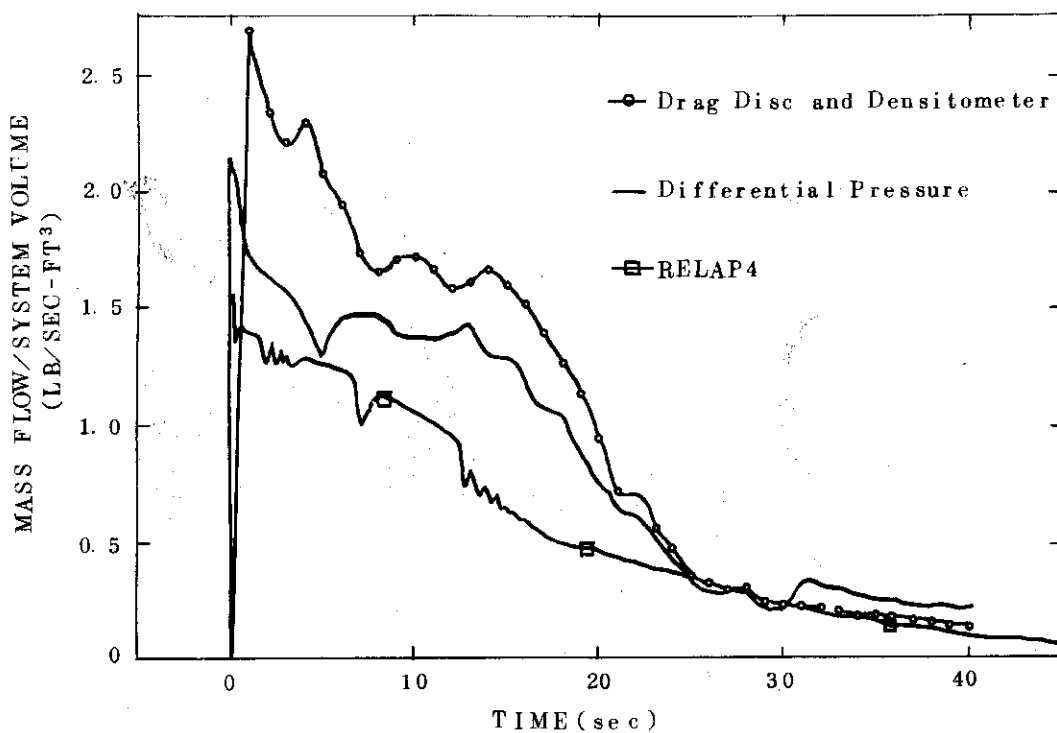


Fig. 4.79 Comparison of Experiment and Analysis of Mass Flow per System Volume at Blowdown Loop Cold Leg

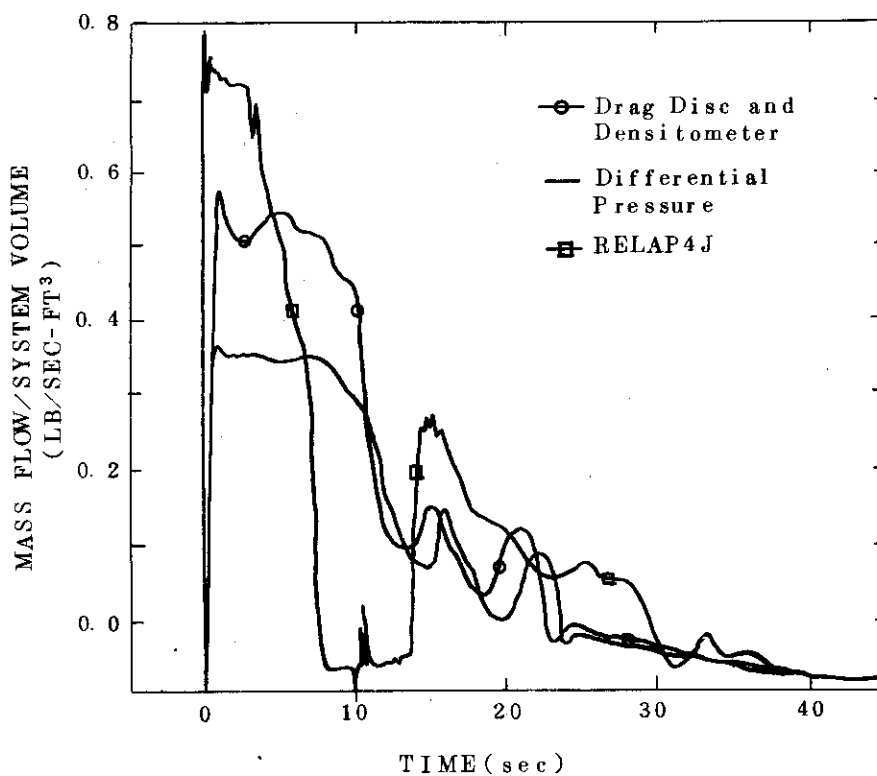


Fig. 4.80 Comparison of Experiment and Analysis of Mass Flow per System Volume at Blowdown Loop Hot Leg

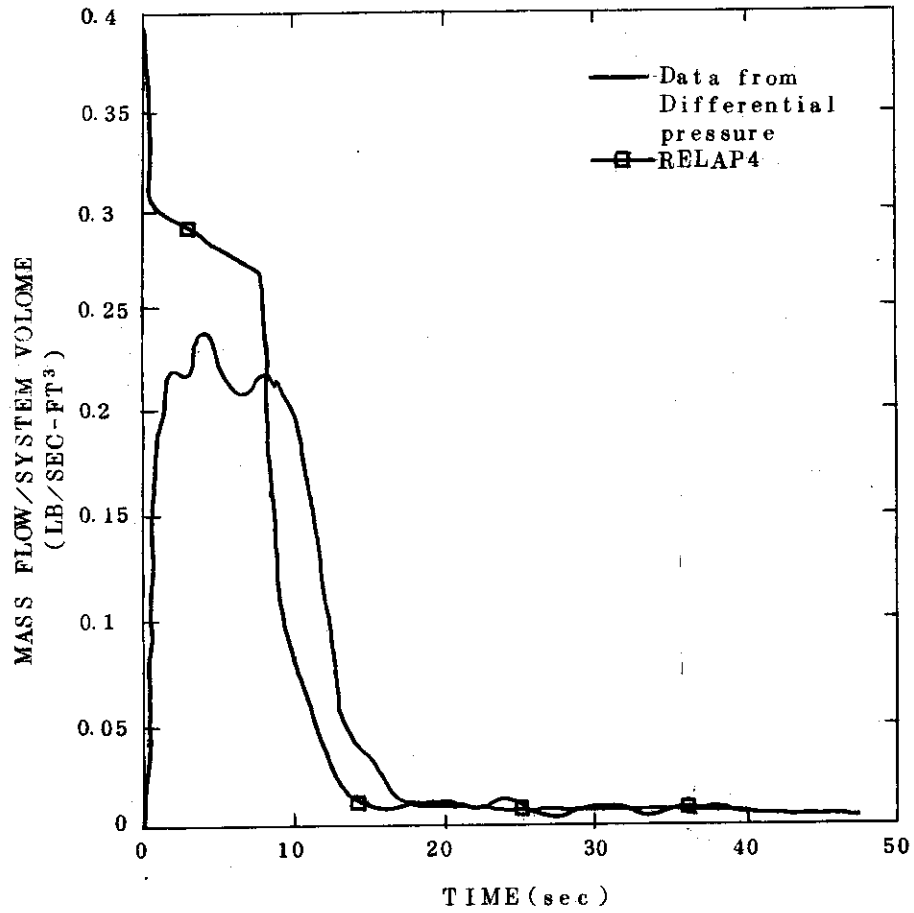


Fig. 4.81 Comparison of Experiment and Analysis of Mass Flow per System Volume at Pressurizer Outlet

## 5. 結 論

LOFTのL1-2実験の解析をRELAP-4Jコードを使って行った。L1シリーズは炉心を抵抗体で模擬し、LOFT炉の冷却材挙動のみを調べる等温ブローダウン実験であり、今後の核燃料による加熱を行うL2シリーズの基礎となるものである。とくにL1-2はECCSを作動させない最も単純なLOCA実験であり、今後の解析に必要な入力データを作成するための基礎となる。解析結果と実験結果を比較検討することにより以下の点が明らかとなった。

- (1) 系の圧力の時間変化は実験結果とよく一致した。圧力の時間変化に大きな影響を及ぼす因子は、(a)破断ループのポンプ模擬体、蒸気発生器模擬体、およびノズルの流動抵抗、(b)ダウンカマーおよび健全ループ蒸気発生器入口側ボリュームにおける水位、(c)ダウンカマー構造体による水の加熱、等である。
- (1-a) 破断ループのポンプ模擬体の形状損失係数は模型実験の結果をもとに定め、蒸気発生器模擬体の形状損失係数は流れの縮小、拡大にともなう項を加えあわせて求めた。ポンプ模擬体および蒸気発生器模擬体の形状損失係数が正しく与えられていることは、ポンプ模擬体および蒸気発生器模擬体の前後の差圧の測定結果が解析結果とよく一致することからも確められている。圧力容器側破断口ノズルの流動抵抗を正しく考慮するためにはノズルをボリュームとして取扱うことが必要である。ノズルをジャンクションとして取扱った場合には系の圧力は実験結果よりはやく降下した。これはノズル部分の摩擦抵抗が考慮されないためであると考えられる。
- (1-b) ダウンカマーの水位が破断ループ低温側配管の上端に達すると圧力容器側破断口からの流出クオリティーは上昇し流量は低下する。系の圧力は水位を考慮しない場合と比較して蒸気の流出量が増える効果によりしばらく低くなるが、その後系の残存水量が多い効果により逆に圧力は高くなる。破断ループ低温側配管の密度もダウンカマー水位の影響を受ける。いっぽう上部プレナムの水位は破断ループ高温側配管における流量、クオリティー、密度、等には大きな影響を及ぼすが、系の圧力には大して影響を及ぼさない。これはループ側破断口との間におもにポンプ模擬体による大きな流動抵抗が存在するためである。逆に高温側配管破断の場合には上部プレナムの水位は系の圧力に大きな影響を及ぼし、ダウンカマーの水位はたいした影響を及ぼさないと考えられる。健全ループの蒸気発生器入口側ボリュームの水位は蒸気発生器を通過する流量を小さくおさえ、それにより健全ループの水のうち圧力容器側破断口から流出する割合を小さくし、系の圧力を高く保つ効果がある。蒸気発生器は大きな高さを持ち健全ループの分水嶺となっている。健全ループの蒸気発生器最高部から低温側配管にかけての流れは全ブローダウン過程を通じ常に正流に保たれている。
- (1-c) ダウンカマーは流路が狭く、構造体の体積が大きく、しかも伝熱面積が大きいため、水を加熱して大量の蒸気を発生し系の圧力を高く保つ効果がある。ダウンカマーの熱源構造体の寄与を正しく取扱うためには水位より上と下での熱伝達率の差を考慮できるよ

りにコードを改良する必要がある。ダウンカマ-以外の熱源構造体が系の圧力に及ぼす影響は小さいことが確められている。

- (2) 加圧器の圧力は測定結果と比較して速く低下した。これは加圧器サージラインの流動抵抗が小さく、加圧器の水が速く流失したためである。サージラインの流動抵抗として考えられるものはすべて解析上考慮されており、この点について、さらに検討するのは当然として、実際に使用されている加圧器サージラインの流動抵抗を单相流で測定することが必要である。加圧器から一次系への流れは破断後上部プレナムと蒸気発生器の間の流れの方向に支配的な働きをし、加圧器の水位が零となると蒸気が直接流出して加圧器の圧力が一次系に伝播して上部プレナムから炉心への逆流を大きくし、上部プレナムの水位に影響を及ぼす。さらに加圧器の圧力が低下し系の圧力に近づくと加圧効果が無くなり系の圧力低下速度は大きくなる。
- (3) 流体温度は破断後30秒近傍まで測定結果とよく一致しているが、その後流量が低下するにつれてずれが大きくなる。その原因としては(a)サブプレッションタンクの圧力の誤差、および(b)構造体による水および熱電対の加熱が考えられる。
- (3-a) サブプレッションタンクの平衡圧力の誤差は約23 psiでありそれによる飽和温度の差は約30°Fである。サブプレッションタンク内は空気が存在し、現在のRELAP-4 Jコードでは厳密な取扱は出来ないが、実効的に平衡圧力が一致するように入力データを改良することは簡単である。サブプレッションタンクの取扱方は流体温度以外には大して影響を及ぼさない。
- (3-b) 構造体による水の加熱の効果が大きい場合には解析上考慮しなければならず、熱電対が構造体によって加熱され見かけ上高い温度を示しているのならば測定法を改良しなければならない。一次系のほとんどすべての熱源構造体を考慮した解析においても破断後32秒までの結果しかないが流体温度はダウンカマ-の熱源構造体のみ考慮した場合と変わらず、測定誤差の可能性が強い。
- (4) 低温側配管における密度の時間変化は測定結果とよく一致するが、高温側配管においては不一致がめだつ。密度に大きな影響を及ぼすのは沸騰開始、水位変化、流量低下にともなう非均質性の増大、等である。
- (4-a) 破断ループ低温側配管における密度の時間変化は実験結果と非常によく一致した。これは破断ループ低温側配管における流量が大きく、計算上仮定した均質流がかなりよく成り立っていることを示している。3方向から測定した密度もおたがいによく一致している。
- (4-b) 健全ループのポンプ入口および低温側配管における密度の時間変化も実験結果とかなりよく一致している。ただし破断後約7秒以後流量の低下にともない非均質性が大きくなり実験結果とのずれがやゝ目立つようになる。3つの方向による密度の測定結果の差も大きくなる。
- (4-c) 破断ループ高温側配管における密度の測定結果は沸騰開始とともに大きな方向依存性を持ち、均質流を仮定した計算により測定結果を完全に説明することは不可能である。しかし計算結果は3方向の測定結果の範囲におさまり、測定結果の定性的傾向もよく表わしている。

- (4-d) 健全ループ高温側配管における密度の計算結果は流れの逆転にともない急激に低下する。測定結果もタイミングは約2秒おくれるがやはり急低下する。破断後10秒以後測定結果の方向依存性が大きくなるが計算結果は測定結果の定性的傾向をよく表わしている。
- (5) 破断ループの低温側配管と高温側配管における流量およびクオリティーは測定結果の定性的傾向をよく表わしているが、定量的には不一致が大きい。計算上は均質流の仮定をしているが、圧力の時間変化が測定結果とよく一致していることから流量およびクオリティーはほぼ正しく計算されていると考えられる。LOFTの配管はかなり太く、モーメントムフラックスの測定結果には非均質性にもとづく誤差が大きいと考えられる。差圧から流量を求める場合には抵抗係数一定の仮定にもとづく誤差がある。モーメントムフラックスおよび差圧からそれぞれ求めた流量の間の矛盾も大きい。
- (6) ポンプ特性は炉心入口流量には影響を及ぼすが、等温ブローダウンにおいては流出流量、系の圧力、流体密度、等に及ぼす影響は小さい。しかし核加熱を行うL2シリーズにおいては炉心における蒸気発生量の差をとるとポンプ特性はブローダウン過程全体に大きな影響を及ぼすと考えられる。したがってポンプ特性の測定を行うと同時に、計算モデルをより現実的なものに改良することが必要である。

## 6. 今後の実験及び解析に対する指針と提言

2節から5節までの本論では、L1-2実験の解析結果を詳細に検討し、解析上の問題点をいくつか指摘した。これらの問題点は、入力データ作成に関するもの、計算モデルに関するもの、計測に関するものに分類することができる。本節では、この分類に従って問題点を整理し、併せて、今後の実験及び解析への指針と提言を与える。

### 6.1 問題点の整理

#### (1) 入力データ作成上の問題点

(1-a) 各部寸法のうち、次の項目についての情報が不足しているため、入力データが不明確である。

##### (a) 蒸気発生器細管の寸法

一次ループの分水嶺となる蒸気発生器最高部の寸法を正確に与える必要がある。今回は、INELの入力データを採用した。

##### (b) 蒸気発生器入口及び出口配管接続部の相対高さ。

資料<sup>[12]</sup>にある寸法に矛盾があり、同一高さにならない。

##### (c) ループシール部の相対高さ。

資料<sup>[12]</sup>にある寸法相互に矛盾がある。

##### (d) ベンチュリー管内部寸法。

ベンチュリー管のどの部の寸法が不明である。

(1-b) 解析コードによる計算を精度よくするには、次の項目について、さらに正確な情報が必要である。

##### (a) 初期温度分布

系内の温度測定値にバラツキがあり、測定上の問題点と併せて改良の余地がある。特に、破断ループ内の温度分布が不明確である。

##### (b) 初期圧力分布

解析上の各ボリュームに対応する圧力の分布をデータから得ることが望ましい。

##### (c) ポンプ特性曲線

核加熱実験までには、ポンプ特性を正確に把握する必要がある。

#### (2) 計算モデル上の問題点

実験と解析の比較から、いくつかの計算モデルの不備に起因する問題点を指摘した。以下の項目について、改良が必要である。

##### (a) 計算モデル上の問題点

現在の解析モデルでは、液体存在を仮定する場合を除き、すべて均質流を仮定する。実験データから、配管内でも不均質な流れが存在することが確かめられている。このような流れを厳密に取扱うには、気液間のスリップを考慮する必要がある。

## (b) ポンプモデル

今回の解析では、ポンプモデルによる違いは小さかったが、炉心に熱源が存在する核試験の混合には、ポンプモデルの精度が影響する。従って、LOFTポンプの2相流特性を知る必要がある。

## (c) 液体が存在する場合の熱源構造体の取扱い。

液体が存在すると、熱源構造体は蒸気に触れる部分と、水に触れる部分が生じる。現在のRELAP-4Jのモデルは流体のボリューム平均値に応じて熱伝達率を定めているが、厳密には、それぞれの領域に分けて定める必要がある。

## (3) 計測上の問題点

(3-a) 計算コードの予測精度の良否を決定するのは、予測値に対応した計測結果との比較である。次の項目については、計測項目を増やす必要がある。

## (a) 加圧器サージライン差圧，流量，密度

加圧器からの一次系ループへの流入が、高温側配管内の冷却材の状態を定める因子であることは、本論の中で明きらかになった。従って、加圧器から、流入する冷却材の状態を把握し、併せて、サージライン内の抵抗を正確に知るために、サージライン内圧力降下，流量，密度の測定が必要である。

## (b) 炉心入口，出口流量，密度

炉心での冷却材の状態は、燃料棒の温度挙動を左右する。従って、炉心へ流入する冷却材の流量，炉心から流出する冷却材の挙動を正確に把握することが必要である。

(c) 蒸気発生器入口側ボリュームに液位を仮定した解析が、最も良い結果を示した。従って、実験結果と比較するためのデータが望ましい。

## (d) 加圧器内液位

加圧器の液位は、差圧から算出されているが、密度変化の影響が無視されている。従って、ダウンカマストークと同様な液位測定を行う必要がある。

## (e) 上部プレナム液位

上部プレナムに液位形成を仮定した解析が、高温側配管の密度変化を定性的によく説明した。従って上部プレナム内の液位の実験データのあることが望ましい。

## (f) 破断ループ内温度分布

破断ループ内の初期温度分布測定が少なく、とくに未飽和減圧の解析にはデータ不足である。従って、少くとも、すべての圧力計測箇所、温度計測を行うことが望ましい。

(3-b) 実験データと解析結果の比較から、次の項目については、計測方法の再検討が必要と思われる。

## (a) ドラグディスク

LOFTの配管径に対し、ドラグディスクが小さく、流れの不均質により影響を受ける。

## (b) 液温測定用熱電対

熱電対の取付位置が、高温壁面の影響を受け易い位置にあって、流量が低下した時温

度指示が流体温度を示していないところが多い。

## 6.2 解析の指針及び実験への提言

今回のL1-2の解析から、今後の解析ではどのような入力データを用い、どの点に注意すべきかが明きらかになった。また今後の実験上必要と思われる計測項目までを指摘した。以下にそれらをまとめて、今後の解析の指針及び実験への提言とする。

### (1) 入力データについての指針

- (a) ボリューム及びジャンクションの切り方は、ケース(18)を標準とし、各部寸法は、Table 3.1に示す値を標準とする。
- (b) ジャンクションにおける形状圧力損失係数は、Table 3.3に示す値を標準とする。
- (c) 初期圧力分布、温度分布については、さらにデータを必要とするが、不十分な場合には、初期流量の差を考慮し、差圧から推定する。同一流量の場合には、L1-2の圧力分布を用いる。

### (2) 計算モデルについての指針

- (a) 非均質流を取扱えるように、スリップを考慮したモデルに改良する。
- (b) LOFTポンプの特性曲線をデータなどから組み込む。
- (c) 液位の存在する場合の熱源構造体との熱伝達モデルを改良する。

### (3) 計測についての提言

- (a) 破断ループ内の冷却材をブローダウン初期流量に相当する流量で循環させ、破断ループ各部での圧力損失を測定する。
- (b) 加圧器サージラインの流動抵抗を測定する。
- (c) LOFTポンプの分離効果試験を行い、特性曲線を得る。
- (d) 6.1節(3)項に述べた計測項目について、改良または、開発する。

## 6.3 今後の方針

LOFT実験は、L1シリーズとして、L1-3Aまで終了している。L1-3Aは、下部プレナムに冷却水を注入した実験であり、コールドレグに注入するL1-4の基礎となる。従って次の解析は、冷却水注入による解析上の問題点を検討するために、L1-3Aの解析を行い、問題点を明きらかにした上で、L1-4の解析に移行する。将来のL2シリーズ以降の核加熱試験の予備的な検討も併せて行う。L1-3A、L1-4実験の解析はまずRELAP-4Jコードで行うが、問題点が整理され入力データが固まった段階でALARM-Pコードによる解析を考えている。LOFTの実験結果およびRELAP-4Jによる解析結果とALARM-Pの解析結果を比較検討し、ALARM-Pを改良するのが今後の解析の目標となる。



## 謝 辞

セミスケール実験の解析経験について御教示いただいた安全工学第1研究室の傍島真，鈴木光弘両氏に感謝致します。また今回のLOFTのL1-2実験の解析結果について御討論いただいた安達公道，生田目健両氏に深く感謝致します。LOFT計画及び実験に関する資料及び情報の入手にあたっては，現地駐在の竹下功氏の御尽力によるところが大きい。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] 原子炉安全専門審査会，“軽水型動力炉の非常用炉心冷却系の安全評価指針”，原子力委員会月報，20，№10，9-18(1975)。
- [2] USAEC，“Acceptance Criteria for ECCS for Light Water Cooled Nuclear Power Reactors”，Docket №RM-50-1，(Dec.1973)。
- [3] Winton, M.L.，“Computer Codes for Analyzing Nuclear Accidents”，Nuclear Safety，15，№5，535-553(1974)。
- [4] ANC，“LOFT Program Description”，LPD-1，(Oct.1974)。
- [5] 斯波正誼，竹下功，“LOFT計画への参加による原研でのLOCA/ECCS解析”，日本原子力学会誌，18，№11，701-709(1976)。
- [6] Cartmill, C.E.，“Thermal Hydraulic Response of the Semiscale MOD-1 System Isothermal Test Series”，ANCR-1228，(Oct.1975)。
- [7] Larson, T.K.，“Core Thermal Response during Semiscale MOD-1 Blowdown Heat Transfer Series”，ANCR-1285，(June 1976)。
- [8] Cozzuol, J.M.，“Thermal Hydraulic Analysis of the Semiscale MOD-1 Blowdown Heat Transfer Test Series”，ANCR-1287，(June 1976)。
- [9] Moore, K.V. and Rettig, W.H.，“RELAP-4, A Computer Program for Transient Thermal Hydraulic Analysis”，ANCR-1127，(Dec. 1973)。
- [10] Sobajima, M.，“An Analysis of Transients in Experiments on Loss-of-Coolant Accidents”，Nuclear Science and Engineering，60，10-18 (1976)。
- [11] Robinson, H.C.，“Experiment Data Report For LOFT NonNuclear Test L1-2”，LTR-20-61，(July 1976)。
- [12] Robinson, H.C.，“LOFT System and Test Description Loss-of-Coolant Experiments Using a Core Simulator”，LTR-20-57，(March 1976)。
- [13] Berta, V.T. et al.，“Experiment Prediction for LOFT Experiment L1-2”，EP-L1-2，(Dec.1975)。

## 謝 辞

セミスケール実験の解析経験について御教示いただいた安全工学第1研究室の傍島真，鈴木光弘両氏に感謝致します。また今回のLOFTのL1-2実験の解析結果について御討論いただいた安達公道，生田目健両氏に深く感謝致します。LOFT計画及び実験に関する資料及び情報の入手にあたっては，現地駐在の竹下功氏の御尽力によるところが大きい。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] 原子炉安全専門審査会，“軽水型動力炉の非常用炉心冷却系の安全評価指針”，原子力委員会月報，20，№10，9-18(1975)。
- [2] USAEC，“Acceptance Criteria for ECCS for Light Water Cooled Nuclear Power Reactors”，Docket №RM-50-1，(Dec.1973)。
- [3] Winton, M.L.，“Computer Codes for Analyzing Nuclear Accidents”，Nuclear Safety, 15，№5，535-553(1974)。
- [4] ANC，“LOFT Program Description”，LPD-1，(Oct.1974)。
- [5] 斯波正誼，竹下功，“LOFT計画への参加による原研でのLOCA/ECCS解析”，日本原子力学会誌，18，№11，701-709(1976)。
- [6] Cartmill, C.E.，“Thermal Hydraulic Response of the Semiscale MOD-1 System Isothermal Test Series”，ANCR-1228，(Oct.1975)。
- [7] Larson, T.K.，“Core Thermal Response during Semiscale MOD-1 Blowdown Heat Transfer Series”，ANCR-1285，(June 1976)。
- [8] Cozzuol, J.M.，“Thermal Hydraulic Analysis of the Semiscale MOD-1 Blowdown Heat Transfer Test Series”，ANCR-1287，(June 1976)。
- [9] Moore, K.V. and Rettig, W.H.，“RELAP-4, A Computer Program for Transient Thermal Hydraulic Analysis”，ANCR-1127，(Dec. 1973)。
- [10] Sobajima, M.，“An Analysis of Transients in Experiments on Loss-of-Coolant Accidents”，Nuclear Science and Engineering, 60，10-18 (1976)。
- [11] Robinson, H.C.，“Experiment Data Report For LOFT NonNuclear Test L1-2”，LTR-20-61，(July 1976)。
- [12] Robinson, H.C.，“LOFT System and Test Description Loss-of-Coolant Experiments Using a Core Simulator”，LTR-20-57，(March 1976)。
- [13] Berta, V.T. et al.，“Experiment Prediction for LOFT Experiment L1-2”，EP-L1-2，(Dec.1975)。

- [14] 日本機械学会論, “ 機械工学便覧 ”, 第 8 編水力学及び流体力学, 16-21(1968).
- [15] Worley, L.C., “ Performance of the LOFT Pump Simulator Model in Two-Phase Steam Water Tests ”, LTR-20-14, (Aug. 1974).
- [16] Wilson, J.F., et al., Trans. Am. Nucl. Soc. , 5 , 151(1962).
- [17] Miller, G.M., “ Experimental Data Report for LOFT Non-Nuclear Test L1-3A ”, LTR 20-62, (Aug. 1976).
- [18] 安全工学第 1 研究室 ROSA グループ, “ ROSA-II 試験データ報告・1 (Run 202, 203, 303, 304, 306) ”, JAERI-M 6240, (Aug. 1975).
- [19] 神永文人, 私信. (Dec. 1976)

JAERI-M 7037

Appendix 1 Listing of Input Data for Case 9

```

1  = PWR(50Mw) LOFT(L1-2) ANALYSIS.G
2  *
3  *      UNIT OPTION
4  *
5  010003  0  0      * INPUT-FT,LB  OUTPUT-FT,LB
6  *
7  *      PROBLEM DIMENSIONS
8  *
9  010001  0  9  3  4  23  2  0  27  2  0  1  0  0  0  0  0  0
10 010001  0  9  3  4  24  2  0  28  2  0  1  0  0  0  0  0  0  *
    CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,
11 010001 -2  9  3  4  24  2  0  28  2  0  1  0  0  0  0  0  0  *
    CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,
12 010001 -2  9  7  4  28  2  0  31  2  1  1  0  0  0  0  0  0
    CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,
13 *
14 *      PROBLEM CONSTANT
15 010002  0,0  1,0
16 *
17 *      EDIT VARIABLES
18 *
19 020000  AP 1  AP 9  AP 16  AP 17  AR 1  AR 9  AR 16  AR 17  TM 16
20 *
21 *      TIME STEP
22 *
23 030010  2  10  2  0  0,01  0,000001  1,0
24 030020  4  50  2  0  0,005  0,00005  10,0
25 030030  8  50  1  0  0,005  0,00005  50,0
26 030010  50  2  2  0  0,0002  0,00001  0,1
    CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,
27 030020  20  10  1  0  0,0005  0,00005  0,8
    CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,
28 030030  10  20  1  0  0,001  0,0001  2,0
    CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,
29 030040  5  10  4  0  0,01  0,0005  7,0
30 030050  5  50  4  0  0,01  0,0005  20,0
31 030060  5  50  4  0  0,01  0,00005  32,0
32 030070  5  50  2  0  0,01  0,0005  56,0
33 *
34 *      TRIP CONTROLS
35 *
36 040010  1  1  0  0  40,0  0,0      * END PROBLEM ON ELAPSED TIME
37 040020  1  -4  1  0  27,0  0,0      * END PROBLEM ON LOW PRESSURE IN VOL 1
38 040020  1  -4  1  0  53,0  0,0      * END PROBLEM ON LOW PRESSURE IN VOL 1
    CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,
39 040030  2  1  0  0  0,0  0,0      * ACTION 2 ON ELAP. TIME (PUMP)
40 040040  3  1  0  0  0,0  0,0      * ACTION 3 ON ELAP. TIME (LEAK)
41 *
42 *      VOLUME DATA
43 *
44 050011  0  0  2269,3  540,0  -1,0  2,63  0,932  0,932  0  0,6827  0,932  15,9
45 050011  0  0  2272,7  539,0  -1,0  2,63  0,932  0,932  0  0,6827  0,932  15,9
    CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,
46 050021  0  0  2269,0  540,0  -1,0  9,76  1,541  1,541  0  0,6827  0,932  15,9
47 050021  0  0  2271,6  540,0  -1,0  9,76  1,541  1,541  0  0,6827  0,932  15,9
    CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,
48 050031  1  0  2258,0  540,0  -1,0  24,8  11,25  11,25  0  1,626  0,0335  17,44 *
49 050031  1  0  2262,1  539,5  -1,0  24,8  11,25  11,25  0  1,626  0,0335  17,44 *
    CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,
50 050041  0  0  2252,0  540,0  -1,0  24,8  11,25  11,25  0  1,626  0,0335  17,44 *
51 050041  0  0  2243,1  539,0  -1,0  24,8  11,25  11,25  0  1,626  0,0335  17,44 *
    CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,
52 050051  0  0  2248,3  540,0  -1,0  7,6  5,708  5,708  0  0,6827  0,932  11,732
53 050051  0  0  2236,7  538,0  -1,0  7,6  5,708  5,708  0  0,6827  0,932  11,732
    CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,
54 050061  0  0  2263,3  540,0  -1,0  7,99  5,099  5,099  0  0,3941  0,7084  11,732
55 050061  0  0  2262,0  540,0  -1,0  7,99  5,099  5,099  0  0,3941  0,7084  11,732
    CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,
56 050061  0  0  2259,5  540,0  -1,0  7,99  5,099  5,099  0  0,3941  0,7084  11,732
    CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,
57 050061  0  0  2265,0  540,0  -1,0  7,99  5,099  5,099  0  0,3941  0,7084  11,732
    CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,
58 050061  0  0  2262,0  540,0  -1,0  7,99  5,099  5,099  0  0,3941  0,7084  11,732
    CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,
59 050071  0  0  2262,8  540,0  -1,0  6,23  5,099  5,099  0  0,3941  0,7084  11,732
60 050071  0  0  2259,5  540,0  -1,0  6,23  5,099  5,099  0  0,3941  0,7084  11,732
    CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,
61 050071  0  0  2259,5  540,0  -1,0  7,99  5,099  5,099  0  0,3941  0,7084  11,732
    CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,
62 050071  0  0  2265,0  540,0  -1,0  7,99  5,099  5,099  0  0,3941  0,7084  11,732
    CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,
63 050071  0  0  2262,0  540,0  -1,0  7,99  5,099  5,099  0  0,3941  0,7084  11,732
    CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,
64 050081  0  0  2276,4  540,0  -1,0  6,35  0,932  0,932  0  0,6827  0,932  15,9

```

JAERI-M 7037

65	050081	0	0	2282.2	540.0	-1.0	6.35	0.932	0.932	0	0.6827	0.932	15.9					
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.																	
66	050091	0	0	2276.1	540.0	-1.0	2.71	0.932	0.932	0	0.6827	0.932	15.9					
67	050091	0	0	2281.7	540.0	-1.0	2.71	0.932	0.932	0	0.6827	0.932	15.9					
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.																	
68	050101	0	0	2275.7	540.0	-1.0	33.3	15.05	15.05	0	1.79	0.323	2.4 *					
69	050101	0	0	2282.5	539.0	-1.0	33.3	15.05	15.05	0	1.79	0.323	2.4 *					
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.																	
70	050111	0	0	2276.3	540.0	-1.0	22.71	3.8	3.8	0	6.68	0.0	0. *					
71	050111	0	0	2283.8	538.0	-1.0	22.71	3.8	3.8	0	6.68	0.0	0. *					
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.																	
72	050121	0	0	2274.2	540.0	-1.0	28.2	8.6	8.6	0	4.26	0.0	3.8 *					
73	050121	0	0	2280.4	539.0	-1.0	28.2	8.6	8.6	0	4.26	0.0	3.8 *					
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.																	
74	050131	0	0	2270.9	540.0	-1.0	10.37	6.8	6.8	0	1.525	0.462	12.57 *					
75	050131	0	0	2274.5	539.0	-1.0	10.37	6.8	6.8	0	1.525	0.462	12.57 *					
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.																	
76	050131	1	0	2274.5	539.0	-1.0	10.37	6.8	6.8	0	1.525	0.462	12.57 *					
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.																	
77	050141	0	0	2271.3	540.0	-1.0	16.7	6.8	6.8	0	2.75	1.87	12.4 *					
78	050141	0	0	2276.9	540.0	-1.0	16.7	6.8	6.8	0	2.75	1.87	12.4 *					
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.																	
79	050141	1	0	2276.9	540.0	-1.0	16.7	6.8	6.8	0	2.75	1.87	12.4 *					
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.																	
80	050151	1	0	2269.0	-1.0	0.0	34.75	6.71	3.71	0	6.0	2.77	20.9 *					
81	050151	1	0	2269.7	-1.0	0.0	34.75	6.71	3.71	0	6.0	2.77	20.9 *					
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.																	
82	050161	0	0	2277.0	540.0	-1.0	4.23	0.932	0.932	0	0.6827	0.932	15.9					
83	050161	0	0	2281.7	537.0	-1.0	4.23	0.932	0.932	0	0.6827	0.932	15.9					
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.																	
84	050171	0	0	2269.0	535.0	-1.0	4.33	0.932	0.932	0	0.6827	0.932	15.9					
85	050171	0	0	2272.7	535.0	-1.0	4.33	0.932	0.932	0	0.6827	0.932	15.9					
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.																	
86	050181	0	0	2269.0	530.0	-1.0	0.43	2.0	2.0	0	0.09	0.338	16.2					
87	050181	0	0	2271.2	530.0	-1.0	0.43	2.0	2.0	0	0.09	0.338	16.2					
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.																	
88	050191	0	0	2269.0	520.0	-1.0	19.39	8.6	8.6	0	1.06	1.22	18.2 *					
89	050191	0	0	2269.7	520.0	-1.0	19.39	8.6	8.6	0	1.06	1.22	18.2 *					
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.																	
90	050201	0	0	2269.0	510.0	-1.0	0.34	3.75	3.75	0	0.09	0.338	14.45					
91	050201	0	0	2272.7	510.0	-1.0	0.34	3.75	3.75	0	0.09	0.338	14.45					
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.																	
92	050211	0	0	2269.0	500.0	-1.0	1.71	2.17	2.17	1	0.6827	0.93	12.28 *					
93	050211	0	0	2275.8	500.0	-1.0	1.71	2.17	2.17	1	0.6827	0.93	12.28 *					
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.																	
94	050221	0	0	2269.0	475.0	-1.0	0.52	3.834	3.834	0	0.09	0.338	12.7 *					
95	050221	0	0	2272.7	475.0	-1.0	0.52	3.834	3.834	0	0.09	0.338	12.7 *					
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.																	
96	050231	0	0	2269.0	643.0	-1.0	0.44	4.069	4.069	0	0.0156	0.0	16.831*					
97	050231	0	0	2271.1	590.0	-1.0	0.44	4.069	4.069	0	0.0156	0.0	16.831*					
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.																	
98	050241	0	0	2273.3	540.0	-1.0	1.75	13.5	13.5	0	0.13	0.0312	2.4 *					
99	050241	0	0	2279.2	539.0	-1.0	1.75	13.5	13.5	0	0.13	0.0312	2.4 *					
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.																	
100	050251	0	0	2277.0	486.0	-1.0	0.1	0.3386	0.3386	0	0.09	0.3386	16.197					
101	050251	0	0	2281.7	486.0	-1.0	0.1	0.3386	0.3386	0	0.09	0.3386	16.197					
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.																	
102	050261	0	0	14.7	50.0	0.0	3700.9	16.094	9.42	0	230.0	3.5	2.56					
103	050261	0	0	30.0	160.0	0.0	3700.9	16.094	9.42	0	230.0	3.5	2.56					
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.																	
104	050271	0	0	2277.0	530.0	-1.0	8.2	2.065	2.065	0	0.42	0.73	16.832					
105	050271	0	0	2282.6	528.0	-1.0	8.2	2.065	2.065	0	0.42	0.73	16.832					
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.																	
106	050281	0	0	2269.0	530.0	-1.0	5.9	2.896	2.896	0	0.42	0.73	16.0					
107	050281	0	0	2273.6	528.0	-1.0	5.9	2.896	2.896	0	0.42	0.73	16.0					
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.																	
108	* BUBBLE DATA																	
109	* BUBBLE DATA																	
110	* BUBBLE DATA																	
111	060011	0	8	3.0														
112	060021	0	8	-3.0														
113	* JUNCTION DATA																	
114	* JUNCTION DATA																	
115	* JUNCTION DATA																	
116	080011	1	2	0	0	588.9	0.6827	16.365	0.0	0.0	0.0	0.1	3	0	0.0	0.0	0.0	0.0
117	080021	2	3	0	0	588.9	0.364	17.44	1.68	2.49	2.16	0	1	0	0.0	0.68	0.0	0.0
118	080031	3	4	0	0	588.9	0.364	27.97	1.37	2.49	2.49	0	1	0	0.0	0.68	0.0	0.0
119	080041	4	5	0	0	588.9	0.364	17.44	1.37	2.16	2.49	0	1	0	0.0	0.68	0.0	0.0
120	080051	5	6	-1	0	288.9	0.6827	12.2	0.0	0.0	0.0	0	1	3	0.0	0.0	0.0	0.0
121	080061	6	8	1	0	288.9	0.3941	16.365	0.0	0.0	0.0	0	1	3	0.0	0.0	0.0	0.0
122	080071	5	7	-2	0	300.0	0.6827	12.2	0.0	0.0	0.0	0	1	3	0.0	0.0	0.0	0.0
123	080081	7	8	2	0	300.0	0.3941	16.365	0.0	0.0	0.0	0	1	3	0.0	0.0	0.0	0.0
124	080091	8	9	0	0	588.9	0.6827	16.365	0.0	0.0	0.0	0	1	3	0.0	0.0	0.0	0.0
125	080101	9	10	0	0	588.9	0.66	16.365	0.0	0.0	0.0	0	1	3	0.0	0.0	0.0	0.0
126	080111	10	11	0	0	588.9	1.48	2.4	0.0	0.0	0.0	0	1	3	0.0	0.0	0.0	0.0
127	080121	11	12	0	0	560.0	1.051	3.8	0.0	0.0	0.0	0	1	3	0.0	0.0	0.0	1

JAERI-M 7037

128	080131	11	24	0	0	28.9	0.13	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	3	3	0.0	0.0	0.0	0.0	*										
129	080141	12	14	0	0	560.0	1.46	12.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	3	0	0.0	0.0	0.0	0.0	*										
130	080151	14	13	0	0	560.0	1.57	16.365	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	3	0	0.0	0.0	0.0	0.0	*										
131	080151	14	13	0	0	560.0	1.57	16.365	0.0	0.0	0.0	0.0	1	1	3	0.0	0.0	0.0	0.0	*										
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,																													
132	080161	13	1	0	0	588.9	0.66	16.365	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	3	0	0.0	0.0	0.0	0.0											
133	080161	13	1	0	0	588.9	0.66	16.365	0.0	0.0	0.0	0.0	1	1	3	0.0	0.0	0.0	0.0											
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,																													
134	080171	23	2	0	0	0.0	0.0156	16.831	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	3	3	0.0	0.6	1.0	*1											
135	080181	10	16	0	0	0.0	0.66	16.365	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	3	0	0.0	0.0	0.0	0.0											
136	080191	13	17	0	0	0.0	0.66	16.365	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	3	0	0.0	0.0	0.0	0.0											
137	080191	13	17	0	0	0.0	0.66	16.365	0.0	0.0	0.0	0.0	1	1	3	0.0	0.0	0.0	0.0											
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,																													
138	080201	17	18	0	0	0.0	0.09	16.365	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	3	0	0.0	0.0	0.0	0.0											
139	080211	18	19	0	0	0.0	0.206	18.2	0.0	16.2	15.7	0.0	0.1	2	0	0.0	0.0	0.0	0.0											
140	080211	18	19	0	0	0.0	0.206	18.2	0.0	7.9	7.4	0.0	0.1	2	0	0.0	0.0	0.0	0.0											
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,																													
141	080221	19	20	0	0	0.0	0.206	18.2	0.0	15.7	16.2	0.0	0.1	2	0	0.0	0.0	0.0	0.0											
142	080221	19	20	0	0	0.0	0.206	18.2	0.0	7.4	7.9	0.0	0.1	2	0	0.0	0.0	0.0	0.0											
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,																													
143	080231	20	21	0	0	0.0	0.09	14.45	0.0	42.0	42.0	0.0	0.1	2	0	0.0	0.0	0.0	0.0											
144	080231	20	21	0	0	0.0	0.09	14.45	0.0	32.4	32.4	0.0	0.1	2	0	0.0	0.0	0.0	0.0											
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,																													
145	080231	20	21	0	0	0.0	0.09	14.45	0.0	12.0	12.0	0.0	0.1	2	0	0.0	0.0	0.0	0.0											
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,																													
146	080231	20	21	0	0	0.0	0.09	14.45	0.0	8.6	8.6	0.0	0.1	2	0	0.0	0.0	0.0	0.0											
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,																													
147	080241	21	22	0	0	0.0	0.09	13.12	0.0	42.0	42.0	0.0	0.1	2	0	0.0	0.0	0.0	0.0											
148	080241	21	22	0	0	0.0	0.09	13.12	0.0	32.4	32.4	0.0	0.1	2	0	0.0	0.0	0.0	0.0											
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,																													
149	080241	21	22	0	0	0.0	0.09	13.12	0.0	12.0	12.0	0.0	0.1	2	0	0.0	0.0	0.0	0.0											
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,																													
150	080241	21	22	0	0	0.0	0.09	13.12	0.0	8.6	8.6	0.0	0.1	2	0	0.0	0.0	0.0	0.0											
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,																													
151	080251	15	23	0	0	0.0	0.0156	20.9	748.9	2.1	2.6	0.0	0.1	0	0	0.0	0.6	0.0	*1											
152	080261	24	13	0	0	28.9	0.13	15.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	3	3	0.0	0.0	0.0	0.0	*										
153	080271	16	25	0	0	0.0	0.09	16.365	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1	3	0	0.0	0.0	0.0											
154	080281	22	26	0	1	0.0	0.09	16.365	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1	3	0	0.0	0.6	0.0											
155	080281	22	26	0	1	0.0	0.09	16.365	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1	3	0	0.0	0.57	0.0	1										
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,																													
156	080291	25	26	0	1	0.0	0.09	16.365	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1	3	0	0.0	0.6	0.0											
157	080291	25	26	0	1	0.0	0.09	16.365	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1	3	0	0.0	0.57	0.0	1										
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,																													
158	080301	27	16	0	0	0.0	0.42	16.832	0.0	0.5	0.5	0.0	1	2	0	0.0	0.0	0.0	0.0											
159	080311	28	17	0	0	0.0	0.42	16.365	0.0	0.5	0.5	0.0	1	2	0	0.0	0.0	0.0	0.0											
160	*																													
161	* PUMP CURVE INPUT INDICATORS																													
162	100000	0	0	16	0																									
163	100000	16	0	0	16																									*
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,																													
164	*																													
165	* PUMP DESCRIPTION																													
166	*																													
167	090011	3	3	1	1	4100.0	0.55	4500.0	620.0	695.3	386.0	0.0	69.5																	
168	090011	1	3	1	1	3530.	0.6324	5000.	350.	465.	521.	38.75	116.86										*							
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,																													
169	090011	1	3	1	1	3530.	0.6324	5000.	306.	443.	386.	48.02	110.7																	
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,																													
170	090011	1	3	1	1	3530.	0.6516	5000.	350.	443.	386.	48.02	110.7																	
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,																													
171	090011	1	3	1	1	3530.	0.6516	5000.	306.	443.	386.	48.02	110.7																	
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,																													
172	090011	1	3	1	1	3530.	0.6516	5000.	320.	443.	386.	48.02	110.7																	
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,																													
173	090011	1	3	1	1	3530.	0.6516	5000.	330.	443.	386.	48.02	110.7																	
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,																													
174	090021	3	3	1	1	4100.0	0.55	4500.0	620.0	695.3	386.0	0.0	69.5																	
175	090021	1	3	1	1	3530.	0.6324	5000.	350.	465.	521.	38.75	116.86									*								
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,																													
176	090021	1	3	1	1	3530.	0.6324	5000.	306.	443.	386.	48.02	110.7																	
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,																													
177	090021	1	3	1	1	3530.	0.6516	5000.	350.	443.	386.	48.02	110.7																	
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,																													
178	090021	1	3	1	1	3530.	0.6516	5000.	306.	443.	386.	48.02	110.7																	
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,																													
179	090021	1	3	1	1	3530.	0.6516	5000.	320.	443.	386.	48.02	110.7																	
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,																													
180	090021	1	3	1	1	3530.	0.6516	5000.	330.	443.	386.	48.02	110.7																	
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,																													
181	*																													
182	* PUMP HEAD AND TORQUE DATA																													
183	*																													
184	101011	1	1	6	0.	1.4036		.19061	1.3636		.38963	1.3186																		
185	101012					.59396	1.2328	.7902	1.1336	1.		1.0078																		
186	101021	1	2	8	0.	-.67		.2	-.5	.4		-.125																		
187	101022					.57554	0.	.74432	.2583		.77348	.3778																		

JAERI-M 7037

188	101023						.86313	.6326	1,	1,0078								
189	101031	1 3 6	-1,				2,4722		-1,80574	2,0474		-1,6069						1,831
190	101032						-1,40683	1,624	-1,200171	1,4705		0,						1,4036
191	101041	1 4 8	-1,				2,4722		-1,82297	1,9968		-1,63332						1,5897
192	101042						-1,45534	1,3279	-1,27109	1,1949		-1,17716						1,0605
193	101043						-1,09073	1,0156	0,	1,934279								
194	101051	1 5 7	0,				1,4118	.25	.2	.28		.4						.34
195	101052						1,	2768	1,59763	1,4584		1,763467						1,6992
196	101053						1,	9465										
197	101061	1 6 10	0,				0,	934279	1,091099	1,9229		1,186509						1,8963
198	101062						1,	875	1,458872	1,8433		1,574406						1,8355
199	101063						1,	740576	1,8466	1,766619		1,871471						1,8838
200	101064						1,	9465										
201	101071	1 7 6	-1,				-1,		-1,8	-1,63		-1,6						-1,3
202	101072						-1,	1,05	-1,2	1,15		0,						.25
203	101081	1 8 6	-1,				-1,		-1,8	-1,97		-1,6						-1,95
204	101082						-1,	1,88	-1,2	-1,8		0,						-1,67
205	101091	2 1 6	0,				0,	6032	1,1930	1,6325		1,393						1,7369
206	101092						1,	59552	1,8331	1,79782		1,9229						1,9672
207	101101	2 2 7	0,				0,	1,67	1,4	-1,25		1,5						1,15
208	101102						1,	737255	1,526586	1,768049		1,606594						1,86723
209	101103						1,	9672										
210	101111	2 3 6	-1,				-1,	1,9843	-1,80096	1,1394		-1,60638						1,0975
211	101112						-1,	1,40686	1,822	-1,19928		1,6648						1,6032
212	101121	2 4 8	-1,				-1,	1,9843	-1,82234	1,8308		-1,63371						1,6824
213	101122						-1,	1,45853	-1,267023	1,4362		-1,176107						1,3879
214	101123						-1,	1,08931	1,13481	0,		1,23361						
215	101131	2 5 4	0,				0,	1,45	1,4	-1,25		1,5						0,
216	101132						1,	3569										
217	101141	2 6 10	0,				0,	1,23361	1,090643	1,11965		1,188569						1,1096
218	101142						1,	27347	1,0416	1,458669		1,8958						1,7807
219	101143						1,	73816	1,6134	1,76852		1,5849						1,87057
220	101144						1,	3569										
221	101151	2 7 4	-1,				-1,		-1,3	-1,9		-1,1						-1,5
222	101152						0,	1,45										
223	101161	2 8 4	-1,				-1,		-1,25	-1,9		-1,08						-1,8
224	101162						0,	1,67										
225	104011	1 1 7	0,	0,	1,	.83	.2	1,09	1,5	1,02	.7	1,01	.9	.94	1,	1,		1,
226	104021	1 2 8	0,	0,	1,	1,04	.2	0,	.3	1,1	.4	.21	.8	.67	.9	.8	1,	1,
227	104031	1 3 10	-1,	-1,	1,	1,16	-1,	1,24	-1,	1,77	-1,	1,23	-1,	1,6	-1,	1,	1,	1,
228	104032																	
229	104041	1 4 10	-1,	-1,	1,	1,16	-1,	1,9	-1,	1,78	-1,	1,8	-1,	1,	1,	1,	1,	1,
230	104042																	
231	104051	1 5 6	0,	0,	1,	1,2	-1,	1,34	1,4	-1,	1,65	1,6	-1,	1,93	1,8	-1,	1,19	1,
232	104061	1 6 10	0,	1,	1,	1,1	1,	1,13	1,25	1,15	1,4	1,13	1,5	1,07	1,6	-1,	1,04	1,
233	104062																	
234	104071	1 7 2	-1,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,
235	104081	1 8 2	-1,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,
236	104091	2 1 6	0,				0,	6032	1,193	1,6325		1,393						1,7369
237	104092						1,	59552	1,8331	1,79782		1,9229						1,9672
238	104101	2 2 7	0,				0,	1,67	1,4	-1,25		1,5						1,15
239	104102						1,	737255	1,526586	1,768049		1,606594						1,86723
240	104103						1,	9672										
241	104111	2 3 6	-1,				-1,	1,9843	-1,80096	1,1394		-1,60638						1,0975
242	104112						-1,	1,40686	1,822	-1,19928		1,6648						1,6032
243	104121	2 4 8	-1,				-1,	1,9843	-1,82234	1,8308		-1,63371						1,6824
244	104122						-1,	1,45853	-1,267023	1,4362		-1,176107						1,3879
245	104123						-1,	1,08931	1,13481	0,		1,23361						
246	104131	2 5 4	0,				0,	1,45	1,4	-1,25		1,5						0,
247	104141	2 6 10	0,				0,	1,23361	1,090643	1,11965		1,188569						1,1096
248	104142						1,	27347	1,0416	1,458669		1,8958						1,7807
249	104143						1,	73816	1,6134	1,76852		1,5849						1,87057
250	104144						1,	3569										
251	104151	2 7 4	-1,	-1,	-1,	1,	1,	1,3	-1,	1,	1,	1,	1,	1,	1,	1,	1,	1,
252	104161	2 8 4	-1,	-1,	-1,	1,	1,	1,25	-1,	1,	1,	1,	1,	1,	1,	1,	1,	1,
253	*																	
254	*																	
255	*																	
256	120100	3 2 27,0	0,0	0,0	0,0	0,02	1,0	100,0	1,0									
257	120100	3 2 53,0	0,0	0,0	0,0	0,02	1,0	100,0	1,0									
258	*																	
259	*																	
260	110010	-3 0,0 0,0 0,0 0,0																
261	*																	
262	*																	
263	*																	
264	091001	-11 0, 0, .1 0, .15 .05 .24 .8 .3 .96 .4 .98																
265	091002	.6 .97 .8 .9 .8 .96 .5 1, 0.																
266	*																	
267	*																	
268	092001	-7 0, 0, .1 0, .15 .05 .24 .56 .8 .56 .96 .45 1, 0.																

Appendix 2 Listing of Input Data for Case 12

```

1  * LOFT(L1-2) ANALYSIS
2  *
3  *      UNIT OPTION
4  *
5  010003  0  0      * INPUT-FT,LB  OUTPUT-FT,LB
6  *
7  *      PROBLEM DIMENSIONS
8  *
9  010001 -2  9  7  4 27  2  0 29  2  1  1  0  1  1  1  0  0
10 *
11 *      PROBLEM CONSTANT
12 010002  0,0  1,0
13 *
14 *      EDIT VARIABLES
15 *
16 020000 AP  1 AP 10 AP 15 AP 21 AP 22 AR  1 AR 10 AR 15 AR 21
17 *
18 *      TIME STEP
19 *
20 030010 50  2  2  0 0,0002  0,00001  0,1
21 030020 20 10  1  0 0,0005  0,00005  0,8
22 030030 10 20  1  0 0,001  0,0001  2,0
23 030040  5 10  4  0 0,01  0,0005  7,0
24 030050  5 50  4  0 0,01  0,0005 20,0
25 030060  5 50  4  0 0,01  0,00005 32,0
26 030070  5 50  2  0 0,01  0,0005 56,0
27 *
28 *      TRIP CONTROLS
29 *
30 040010  1  1  0  0 40,0  0,0      * END PROBLEM ON ELAPSED TIME
31 040020  1 -4  1  0 53,0  0,0      * END PROBLEM ON LOW PRESSURE IN VOL 1
32 040020  1 -4  1  0 27,0  0,0      * END PROBLEM ON LOW PRESSURE IN VOL 1
33 CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,
34 040030  2  1  0  0  0,0  0,0      * ACTION 2 ON ELAP, TIME (PUMP)
35 040040  3  1  0  0  0,0  0,0      * ACTION 3 ON ELAP, TIME (LEAK)
36 *
37 *      VOLUME DATA
38 050011  0  0 2272,7 539,0 -1,0  4,92  0,932 0,932  0  0,6827 ,932 -0,466
39 050021  0  0 2272,0 540,0 -1,0  2,42  0,932 0,932  0  0,6827 ,932 -0,466
40 050031  0  0 2271,3 540,0 -1,0  5,85  1,26  1,26  0  0,6827 ,932 -0,466
41 050041  1  0 2262,1 539,5 -1,0 24,9  11,25 11,25  0  1,6262 ,0335 0,312
42 050051  0  0 2243,1 539,0 -1,0 24,9  11,25 11,25  0  1,6262 ,0335 0,312
43 050061  0  0 2236,7 538,0 -1,0  6,17  5,53  5,53  0  0,6827 ,932 -4,633
44 050071  0  0 2262,0 540,0 -1,0  6,855 4,987 4,987  0  0,6827 ,932 -4,633
45 050081  0  0 2262,0 540,0 -1,0  8,035 4,987 4,987  0  0,6827 ,932 -4,633
46 050091  0  0 2282,2 540,0 -1,0  4,02  0,932 0,932  0  0,6827 ,932 -0,466
47 050101  0  0 2281,7 540,0 -1,0  5,29  0,932 0,932  0  0,6827 ,932 -0,466
48 050111  0  0 2282,5 539,0 -1,0 33,3 16,963 16,963  0  1,963 ,162 -13,96
49 050121  0  0 2283,8 538,0 -1,0 22,71  2,703 2,703  0  8,402 3,271 -16,365
50 050131  0  0 2280,4 539,0 -1,0 32,3 11,587 11,587  0  2,788 1,884 -13,662
51 050141  1  0 2276,9 540,0 -1,0 10,9  5,028 5,028  0  2,483 1,778 -2,075
52 050151  0  0 2272,7 535,0 -1,0  5,793 0,932 0,932  0  0,6827 ,932 -0,466
53 050161  0  0 2271,2 530,0 -1,0  0,448 2,523 2,523  0  0,09 ,339 -0,169
54 050171  0  0 2269,7 520,0 -1,0 11,89  9,476 9,476  0  1,137 1,203  2,354
55 050181  0  0 2269,7 520,0 -1,0 11,89  9,476 9,476  0  1,137 1,203  2,354
56 050191  0  0 2272,7 500,0 -1,0  1,764 6,80  6,80  0  0,276 ,593 -4,445
57 050201  0  0 2272,7 475,0 -1,0  0,556 4,148 4,148  0  0,09 ,339 -4,148
58 050211  0  0 2281,7 537,0 -1,0  4,963 0,932 0,932  0  0,6827 ,932 -0,466
59 050211  0  0 2281,7 537,0 -1,0  4,893 0,932 0,932  0  0,6827 ,932 -0,466
60 CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD,
61 050221  1  0 2269,7 -1,0  0,0  34,0  6,777 4,206  0  7,168 3,127  3,848
62 050231  0  0 2271,1 590,0 -1,0  0,448 3,382 3,382  0  0,0156 ,141 0,466
63 050241  0  0 2273,6 528,0 -1,0  5,853 2,828 2,828  0  0,418 ,729 -0,3646
64 050251  0  0 2282,6 528,0 -1,0  6,792 1,993 1,993  0  0,418 ,729 0,466
65 050261  0  0 30,0 160,0  0,0 3700,9 16,094 9,42  0  230,0 17,1 -13,55
66 050271  0  0 2281,7 486,0 -1,0  0,144 ,3386 ,3386  0  0,09 ,3386 -0,169
67 *
68 *      BUBBLE DATA
69 060011  0,8  3,0
70 060021  0,8 -3,0
71 *
72 *      JUNCTION DATA

```





156	101132			1,		,3569													
157	101141	2	6	10	0,	0,	1,23361	,090643	1,1965		,188569	1,1096							
158	101142					,27347	1,0416	,458669	,8958		,57448	,7807							
159	101143					,73816	,6134	,76852	,5849		,870057	,4877							
160	101144					1,	,3569												
161	101151	2	7	4	-1,	-1,		-.3	-.9		-.1	-.5							
162	101152					0,	-.45												
163	101161	2	8	4	-1,	-1,		-.25	-.9		-.08	-.8							
164	101162					0,	-.67												
165	104011	1	1	7	0,	0,	.1 ,83 ,2	1,09 ,5	1,02 ,7	1,01 ,9	,94 1,	1,							
166	104021	1	2	8	0,	0,	.1 -.04 ,2	0, ,3 ,1 ,4	,21 ,8	,67 ,9	,8 1, 1,								
167	104031	1	3	10	-1,	-1,16	-.9 -1,24	-.8 -1,77	-.7 -2,36	-.6 -2,79	-.5 2,91								
168	104032					-.4 -2,67	-.25 -1,69	-.1 -.5	0, 0,										
169	104041	1	4	10	-1,	-1,16	-.9 -.78	-.8 -.5	-.7 -.31	-.6 -.17	-.5 -.08								
170	104042					-.35	0, -.2 ,05	-.1 ,08	0, ,11										
171	104051	1	5	6	0,	0,	.2 -.34	,4 -.65	,6 -.93	,8 -1,19	1, -1,47								
172	104061	1	6	10	0,	,11	,1 ,13 ,25	,15 ,4 ,13	,5 ,07	,6 -.04	,7 -.23								
173	104062					,8	-.51 ,9 -.91	1, -1,47											
174	104071	1	7	2	-1,	0,	0,	0,											
175	104081	1	8	2	-1,	0,	0,	0,											
176	104091	2	1	6		0,	,6032	,193	,6325	,393	,7369								
177	104092					,59552	,8331	,79782	,9229	1,	,9672								
178	104101	2	2	7		0,	-.67	,4	-.25	,5	,15								
179	104102					,737255	,526586	,768049	,606594	,86723	,74366								
180	104103					1,	,9672												
181	104111	2	3	6	-1,		1,9843	-.80096	1,394	-.60638	1,0975								
182	104112					-.40686	,822	-.19928	,6648	0,	,6032								
183	104121	2	4	8	-1,		1,9843	-.82234	1,8308	-.63371	1,6824								
184	104122					-.45853	1,557	-.267023	1,4362	-.176107	1,3879								
185	104123					-.08931	1,3481	0,	1,23361										
186	104131	2	5	4	0,	-.45	,4 -.25	,5	0, 1,	,3569									
187	104141	2	6	10		0,	1,23361	,090643	1,1965	,188569	1,1096								
188	104142					,27347	1,0416	,458669	,8958	,57448	,7807								
189	104143					,73816	,6134	,76852	,5849	,870057	,4877								
190	104144					1,	,3569												
191	104151	2	7	4	-1,	-1,	-.3 -.9	-.1 -.5	0, -.45										
192	104161	2	8	4	-1,	-1,	-.25 -.9	-.08 -.8	0, -.67										
193	*																		
194	*	VALVE DATA																	
195	110010	-3	0,0	0,0	0,0	0,0													
196	*																		
197	*	LEAK TABLE																	
198	*																		
199	120100	3	2	27,0	0,0	0,0	0,02	1,0	100,0	1,0									
200	120100	3	2	53,0	0,0	0,0	0,02	1,0	100,0	1,0									
201	150011	0	11	i	0	0,0	820,3	482,5	0,0	0,0									
202	170101	1	1	1	5	0,0	0,84	0,0											
203	180101	-2					* SS304	THERMAL CONDUCTIVITY											
204	180102	212,	9.574	2372,	19,294														
205	190101	-13					* SS304	HEAT CAPACITY											
206	190102	170,	44,46081				250,	44,32964		400,	44,48722								
207	190103	600,	45,39201				800,	46,90938		1000,	48,84151								
208	190104	1200,	50,99056				1400,	53,15869		1600,	55,14808								
209	190105	1800,	56,76090				2000,	57,79932		2200,	58,06550								
210	190106	2400,	57,36161																
211																			

Appendix 3 Listing of Input Data for Case 15

```

1  = LOFT(L1-2) ANALYSIS
2  *
3  *   UNIT OPTION
4  *
5  010003 0 0      * INPUT=FT, LB   OUTPUT=FT, LB
6  *
7  *   PROBLEM DIMENSIONS
8  *
9  010001 -2 9 7 4 27 2 0 29 2 1 1 0 1 1 1 0 0
10 010001 -2 9 7 4 27 2 0 29 2 1 1 0 23 9 1 0 0
    CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.
11 *
12 *   PROBLEM CONSTANT
13 010002 0.0 1.0
14 *
15 *   EDIT VARIABLES
16 *
17 020000 AP 1 AP 10 AP 15 AP 21 AP 22 AR 1 AR 10 AR 15 AR 21
18 *
19 *   TIME STEP
20 *
21 040010 50 2 2 0 0.0002 0.00001 0.1
22 030020 20 10 1 0 0.0005 0.00005 0.8
23 040030 10 20 1 0 0.001 0.0001 2.0
24 040040 5 10 4 0 0.01 0.0005 7.0
25 030050 5 50 4 0 0.01 0.0005 20.0
26 030060 5 50 4 0 0.01 0.00005 32.0
27 030070 5 50 2 0 0.01 0.0005 56.0
28 *
29 *   TRIP CONTROLS
30 *
31 040010 1 1 0 0 50.0 0.0 * END PROBLEM ON ELAPSED TIME
32 040020 1 -4 1 0 53.0 0.0 * END PROBLEM ON LOW PRESSURE IN VOL 1
33 040020 1 -4 1 0 27.0 0.0 * END PROBLEM ON LOW PRESSURE IN VOL 1
    CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.
34 040030 2 1 0 0 0.0 0.0 * ACTION 2 ON ELAP, TIME (PUMP)
35 040040 3 1 0 0 0.0 0.0 * ACTION 3 ON ELAP, TIME (LEAK)
36 *
37 *   VOLUME DATA
38 *
39 050011 0 0 2272.7 539.0 -1.0 4.92 0.932 0.932 0 0.6827 .932 -0.466
40 050021 0 0 2272.0 540.0 -1.0 2.42 0.932 0.932 0 0.6827 .932 -0.466
41 050031 0 0 2271.3 540.0 -1.0 5.85 1.26 1.26 0 0.6827 .932 -0.466
42 050041 1 0 2262.1 539.5 -1.0 24.9 11.25 11.25 0 1.6262 .0335 0.312
43 050051 0 0 2243.1 539.0 -1.0 24.9 11.25 11.25 0 1.6262 .0335 0.312
44 050061 0 0 2236.7 538.0 -1.0 6.17 5.53 5.53 0 0.6827 .932 -4.633
45 050071 0 0 2262.0 540.0 -1.0 6.855 4.987 4.987 0 0.6827 .932 -4.633
46 050081 0 0 2262.0 540.0 -1.0 8.035 4.987 4.987 0 0.6827 .932 -4.633
47 050091 0 0 2282.2 540.0 -1.0 4.02 0.932 0.932 0 0.6827 .932 -0.466
48 050101 0 0 2281.7 540.0 -1.0 5.29 0.932 0.932 0 0.6827 .932 -0.466
49 050111 0 0 2282.5 539.0 -1.0 33.3 16.963 16.963 0 1.963 .162 -13.96
50 050111 1 0 2282.5 539.0 -1.0 33.3 16.963 16.963 0 1.963 .162 -13.96
    CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.
51 050121 0 0 2283.8 538.0 -1.0 22.71 2.703 2.703 0 8.402 3.271 -16.365
52 050131 0 0 2280.4 539.0 -1.0 32.3 11.587 11.587 0 2.768 1.884 -13.662
53 050141 1 0 2276.9 540.0 -1.0 10.9 5.028 5.028 0 2.483 1.778 -2.075
54 050151 0 0 2272.7 535.0 -1.0 3.793 0.932 0.932 0 0.6827 .932 -0.466
55 050161 0 0 2271.2 530.0 -1.0 0.448 2.523 2.523 0 0.09 .339 -0.169
56 050171 0 0 2269.7 520.0 -1.0 11.89 9.476 9.476 0 1.137 1.203 2.354
57 050181 0 0 2269.7 520.0 -1.0 11.89 9.476 9.476 0 1.137 1.203 2.354
58 050191 0 0 2272.7 500.0 -1.0 1.764 6.80 6.80 0 0.276 .593 -4.445
59 050201 0 0 2272.7 475.0 -1.0 0.556 4.148 4.148 0 0.09 .339 -4.148
60 050211 0 0 2281.7 537.0 -1.0 4.963 0.932 0.932 0 0.6827 .932 -0.466
61 050211 0 0 2281.7 537.0 -1.0 4.893 0.932 0.932 0 0.6827 .932 -0.466
    CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.
62 050221 1 0 2269.7 -1.0 0.0 34.0 6.777 4.206 0 7.68 3.127 3.848
63 050231 0 0 2271.1 590.0 -1.0 0.448 3.382 3.382 0 0.0156 .141 0.466
64 050241 0 0 2273.6 528.0 -1.0 5.853 2.828 2.828 0 0.418 .729 -0.3646
65 050251 0 0 2282.6 528.0 -1.0 6.792 1.993 1.993 0 0.418 .729 0.466
66 050261 0 0 30.0 160.0 0.0 3700.9 16.094 9.42 0 230.0 17.1 -13.55
67 050271 0 0 2281.7 486.0 -1.0 0.144 .3386 .3386 0 0.09 .3386 -0.169
68 *
69 *   BUBBLE DATA
70 *
71 060011 0.8 3.0
72 060021 0.8 -3.0
73 *
74 *   JUNCTION DATA

```



JAERI-M 7037

154	101111	2 3 6	-1.	1.9843	-.80096	1.394	-.60638	1.0975
155	101112		-.40686	.822	-.19928	.6648	0.	.6032
156	101121	2 4 8	-1.	1.9843	-.82234	1.8308	-.63371	1.6824
157	101122		-.45853	1.557	-.267023	1.4362	-.176107	1.3879
158	101123		-.08931	1.3481	0.	1.23361		
159	101131	2 5 4	0.	-.45	.4	-.25	.5	0.
160	101132		1.	.3569				
161	101141	2 6 10	0.	1.23361	.090643	1.1965	.188569	1.1096
162	101142		.27347	1.0416	.458669	.8958	.57448	.7807
163	101143		.73816	.6134	.76852	.5849	.870057	.4877
164	101144		1.	.3569				
165	101151	2 7 4	-1.	-1.	-.3	-.9	-.1	-.5
166	101152		0.	-.45				
167	101161	2 8 4	-1.	-1.	-.25	-.9	-.08	-.8
168	101162		0.	-.67				
169	104011	1 1 7 0.	0.	.1 .83 .2	1.09 .5 1.02 .7	1.01 .9 .94 1. 1.		
170	104021	1 2 8 0.	0.	.1 .04 .2	0. .3 .1 .4 .21 .8	.67 .9 .8 1. 1.		
171	104031	1 3 10 -1.	-1.	-1.16 -.9 -1.24	-.8 -1.77 -.7 -2.36	-.6 -2.79 -.5 2.9 1.		
172	104032		-.4 -2.67 -2.25	-1.69 -.1 -.5 0. 0.				
173	104041	1 4 10 -1.	-1.	-1.16 -.9 -.78 -.8	-.5 -.7 -.31 -.6	-.17 -.5 -.08		
174	104042		-.35 0. -.2 .05	-.1 .08 0. .11				
175	104051	1 5 6 0.	0.	.2 -.34 .4 -.65 .6	-.93 .8 -1.19 1. -1.47			
176	104061	1 6 10 0.	0.	.11 .1 .13 .25 .15 .4	.13 .5 .07 .6 -.04 .7	-.23		
177	104062		.8 -.51 .9	-.91 1. -1.47				
178	104071	1 7 2	-1. 0. 0. 0.					
179	104081	1 8 2	-1. 0. 0. 0.					
180	104091	2 1 6	0.	.6032	.193	.6325	.393	.7369
181	104092		.59552	.8331	.79782	.9229	1.	.9672
182	104101	2 2 7	0.	-.67	.4	-.25	.5	.15
183	104102		.737255	.526586	.768049	.606594	.86723	.74366
184	104103		1.	.9672				
185	104111	2 3 6	-1.	1.9843	-.80096	1.394	-.60638	1.0975
186	104112		-.40686	.822	-.19928	.6648	0.	.6032
187	104121	2 4 8	-1.	1.9843	-.82234	1.8308	-.63371	1.6824
188	104122		-.45853	1.557	-.267023	1.4362	-.176107	1.3879
189	104123		-.08931	1.3481	0.	1.23361		
190	104131	2 5 4	0.	-.45	.4 -.25	.5 0. 1. .3569		
191	104141	2 6 10	0.	1.23361	.090643	1.1965	.188569	1.1096
192	104142		.27347	1.0416	.458669	.8958	.57448	.7807
193	104143		.73816	.6134	.76852	.5849	.870057	.4877
194	104144		1.	.3569				
195	104151	2 7 4	-1. -1. -.3 -.9	-.1 -.5 0. -.45				
196	104161	2 8 4	-1. -1. -.25 -.9	-.08 -.8 0. -.67				
197	*							
198	*	VALVE DATA						
199	110010	-3 0.0 0.0 0.0 0.0						
200	*							
201	*	LEAK TABLE						
202	*							
203	120100	3 2 27.0	0.0 0.0 0.02 1.0	100.0 1.0				
204	120100	3 2 53.0	0.0 0.0 0.02 1.0	100.0 1.0				
205	150011	0 11 1 0 0.0	420.3 482.5 0.0 0.0					
206	170101	1 1 1 5 0.0	0.84 0.0					
207	150011	1 0 2 0	15.45 0.0 2.038 0.932 0.0					
208	150021	2 0 2 0	19.52 0.0 2.575 0.932 0.0					
209	150031	3 0 2 0	24.46 0.0 3.414 0.932 0.0					
210	150041	4 0 3 0	15.9 0.0 5.267 1.462 0.0					
211	150051	5 0 3 0	15.9 0.0 5.267 1.462 0.0					
212	150061	6 0 2 0	26.74 0.0 3.661 0.932 0.0					
213	150071	7 0 2 0	9.635 0.0 1.271 0.932 0.0					
214	150081	8 0 2 0	9.635 0.0 1.271 0.932 0.0					
215	150091	9 0 2 0	26.97 0.0 3.558 0.932 0.0					
216	150101	10 0 2 0	13.85 0.0 1.828 0.932 0.0					
217	150111	11 0 1 0	157.6 0.0 144.8 0.333 0.0					
218	150121	0 11 9 0 0.0	130.0 24.10 0.0 0.333					
219	150111	0 11 9 0 0.0	400.0 200.0 0.0 0.162					
220	150121	0 11 9 0 0.0	420.3 242.5 0.0 0.162					
221	150131	12 0 1 0	43.41 0.0 39.89 2.892 0.0					
222	150141	12 0 4 0	70.0 0.0 2.728 1.744 0.0					
223	150151	13 0 5 0	60.32 0.0 5.236 2.313 0.0					
224	150161	14 0 6 0	33.53 0.0 1.430 1.314 0.0					
225	150171	15 0 2 0	13.72 0.0 1.811 0.932 0.0					
226	150181	16 0 8 0	6.83 0.0 0.506 0.339 0.0					
227	150191	17 0 7 0	32.66 0.0 5.45 1.203 0.0					
228	150201	18 0 7 0	32.66 0.0 5.45 1.203 0.0					
229	150211	19 0 2 0	7.33 0.0 0.967 0.932 0.0					
230	150221	20 0 8 0	3.42 0.0 0.253 0.339 0.0					
231	150231	21 0 2 0	25.19 0.0 3.324 0.932 0.0					

JAERI-M 7037

232	170101	2	2	1	4	1.667	0.25	0.0
	CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.							
233	170102	0	1	4		0.5	0.0	0.0
234	170201	2	2	1	4	0.466	0.039	0.0
235	170202	0	1	4		0.078	0.0	0.0
236	170301	2	2	1	4	2.25	0.021	0.0
237	170302	0	1	4		0.271	0.0	0.0
238	170401	1	2	1	4	0.0	0.013	0.0
239	170402	0	1	4		0.026	0.0	0.0
240	170501	2	2	1	4	1.019	0.042	0.0
241	170502	0	1	4		0.042	0.0	0.0
242	170601	2	2	1	4	0.894	0.021	0.0
243	170602	0	1	4		0.021	0.0	0.0
244	170701	2	2	1	4	0.602	0.050	0.0
245	170702	0	1	4		0.099	0.0	0.0
246	170801	2	2	1	4	0.169	0.021	0.0
247	170802	0	1	4		0.042	0.0	0.0
248	170901	1	1	1	5	0.0	0.84	0.0
249	180101	-2				* SS304 THERMAL CONDUCTIVITY		
250	180102	212.	9.574	2372.	19.294			
251	190101	-13				* SS304 HEAT CAPACITY		
252	190102	170.	44.48081	250.	44.32964	400.	44.48722	
253	190103	600.	45.39201	800.	46.90938	1000.	48.84151	
254	190104	1200.	50.99056	1400.	53.15869	1600.	55.14808	
255	190105	1800.	56.76090	2000.	57.79932	2200.	58.06550	
256	190106	2400.	57.36161					
257								

Appendix 4 Listing of Input Data for Case 18

```

1  * LOFT(L1-2) ANALYSIS
2  *
3  * UNIT OPTION
4  *
5  010003 0 0 * INPUT-FT, LB OUTPUT-FT, LB
6  *
7  * PROBLEM DIMENSIONS
8  *
9  010001 -2 9 7 4 27 2 0 29 2 1 1 0 23 9 1 0 0
10 010001 -2 9 7 4 27 2 0 29 2 1 1 0 1 1 1 0 0
    CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.
11 010001 -2 9 7 4 28 2 0 30 2 1 1 0 1 1 1 0 0
    CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.
12 *
13 * PROBLEM CONSTANT
14 010002 0.0 1.0
15 *
16 * EDIT VARIABLES
17 *
18 020000 AP 1 AP 10 AP 15 AP 21 AP 22 AR 1 AR 10 AR 15 AR 21
19 *
20 * TIME STEP
21 *
22 030010 50 2 2 0 0.0002 0.00001 0.1
23 030020 20 10 1 0 0.0005 0.00005 0.8
24 030030 10 20 1 0 0.001 0.0001 2.0
25 030040 5 10 4 0 0.01 0.0005 7.0
26 030050 5 50 4 0 0.01 0.0005 20.0
27 030060 5 50 4 0 0.01 0.00005 32.0
28 030070 5 50 2 0 0.01 0.0005 56.0
29 *
30 * TRIP CONTROLS
31 *
32 040010 1 1 0 0 50.0 0.0 * END PROBLEM ON ELAPSED TIME
33 040020 1 -4 1 0 53.0 0.0 * END PROBLEM ON LOW PRESSURE IN VOL 1
34 040020 1 -4 1 0 27.0 0.0 * END PROBLEM ON LOW PRESSURE IN VOL 1
    CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.
35 040030 2 1 0 0 0.0 0.0 * ACTION 2 ON ELAP. TIME (PUMP)
36 040040 3 1 0 0 0.0 0.0 * ACTION 3 ON ELAP. TIME (LEAK)
37 *
38 * VOLUME DATA
39 *
40 050011 0 0 2272.7 539.0 -1.0 4.92 0.932 0.932 0 0.6827 .932 -0.466
41 050021 0 0 2272.0 540.0 -1.0 2.42 0.932 0.932 0 0.6827 .932 -0.466
42 050031 0 0 2271.3 540.0 -1.0 5.85 1.26 1.26 0 0.6827 .932 -0.466
43 050041 0 0 2262.1 539.5 -1.0 24.9 11.25 11.25 0 1.6262 .0335 0.312
44 050051 0 0 2243.1 539.0 -1.0 24.9 11.25 11.25 0 1.6262 .0335 0.312
45 050061 0 0 2236.7 538.0 -1.0 6.17 5.53 5.53 0 0.6827 .932 -4.633
46 050071 0 0 2262.0 540.0 -1.0 6.855 4.987 4.987 0 0.6827 .932 -4.633
47 050081 0 0 2262.0 540.0 -1.0 8.035 4.987 4.987 0 0.6827 .932 -4.633
48 050091 0 0 2282.2 540.0 -1.0 4.02 0.932 0.932 0 0.6827 .932 -0.466
49 050101 0 0 2281.7 540.0 -1.0 5.29 0.932 0.932 0 0.6827 .932 -0.466
50 050111 0 0 2282.5 539.0 -1.0 33.3 16.963 16.963 0 1.963 .162 -13.96
51 050111 0 0 2282.5 539.0 -1.0 33.3 16.963 16.963 0 1.963 .162 -13.96
    CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.
52 050121 0 0 2283.8 538.0 -1.0 22.71 2.703 2.703 0 8.402 3.271 -16.365
53 050131 0 0 2280.4 539.0 -1.0 32.3 11.587 11.587 0 2.788 1.884 -13.662
54 050141 0 0 2276.9 540.0 -1.0 10.9 5.028 5.028 0 2.483 1.778 -2.075
55 050151 0 0 2272.7 535.0 -1.0 5.793 0.932 0.932 0 0.6827 .932 -0.466
56 050161 0 0 2271.2 530.0 -1.0 0.448 2.523 2.523 0 0.09 .339 -0.169
57 050171 0 0 2269.7 520.0 -1.0 11.89 9.476 9.476 0 1.137 1.203 2.354
58 050181 0 0 2269.7 520.0 -1.0 11.89 9.476 9.476 0 1.137 1.203 2.354
59 050191 0 0 2272.7 500.0 -1.0 1.764 6.80 6.80 0 0.276 .593 -4.445
60 050201 0 0 2272.7 475.0 -1.0 0.556 4.148 4.148 0 0.09 .339 -4.148
61 050211 0 0 2281.7 537.0 -1.0 4.963 0.932 0.932 0 0.6827 .932 -0.466
62 050211 0 0 2281.7 537.0 -1.0 4.893 0.932 0.932 0 0.6827 .932 -0.466
    CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.
63 050221 1 0 2269.7 -1.0 0.0 34.0 6.777 4.206 0 7.68 3.127 3.848
64 050221 1 0 2269.7 -1.0 0.0 36.3 5.970 3.454 0 6.08 2.78 3.848
    CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.
65 050231 0 0 2271.1 590.0 -1.0 0.448 3.382 3.382 0 0.0156 .141 0.466
66 050231 0 0 2271.1 590.0 -1.0 0.448 3.382 3.382 0 0.0156 .141 0.466
    CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.
67 050231 0 0 2271.1 575.0 -1.0 0.224 3.382 3.382 0 0.0156 .141 0.466
    CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.
68 050241 0 0 2273.6 528.0 -1.0 5.853 2.828 2.828 0 0.418 .729 -0.3646
69 050251 0 0 2282.6 528.0 -1.0 6.792 1.993 1.993 0 0.418 .729 0.466
70 050261 0 0 30.0 160.0 0.0 3700.9 16.094 9.42 0 230.0 17.1 -13.55
71 050271 0 0 2281.7 486.0 -1.0 0.144 .3386 .3386 0 0.09 .3386 -0.169
72 050281 0 0 2269.7 610.0 -1.0 0.224 0.141 0.141 0 0.0156 .141 3.707
73 050281 0 0 2269.7 610.0 -1.0 0.224 0.664 0.664 0 0.0156 .140 3.707
    CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.

```

JAERI-M 7037

```

74 *
75 *      BUBBLE DATA
76 *
77 060011 0.8 3.0
78 060021 0.8 -3.0
79 *
80 *      JUNCTION DATA
81 *
82 080011 1 2 0 0 586.1 0.6827 0.0 .0 0.0 0.0 0 1 2 0 0.0 0.0 1 0
83 080021 2 3 0 0 586.1 0.6827 0.0 .0 0.0 0.0 0 1 2 0 0.0 0.0 1 0
84 080031 3 4 0 0 586.1 0.3465 0.794 .0 0.0 0.0 0 1 2 0 0.0 0.0 1 0
85 080041 4 5 0 0 586.1 1.63 10.03 .0 0.0 0.0 0 1 2 0 0.0 0.0 1 0
86 080051 5 6 0 0 586.1 0.3465 0.897 .0 0.0 0.0 0 1 2 0 0.0 0.0 1 0
87 080061 6 7 -1 0 293.1 0.6827 -4.167 .0 0.0 0.0 0 1 2 0 0.0 0.0 1 0
88 080071 6 8 -2 0 293.0 0.6827 -4.167 .0 0.0 0.0 0 1 2 0 0.0 0.0 1 0
89 080081 7 9 1 0 293.1 0.3941 0.0 .0 0.0 0.0 0 1 2 0 0.0 0.0 1 0
90 080091 8 9 2 0 293.0 0.3941 0.0 .0 0.0 0.0 0 1 2 0 0.0 0.0 1 0
91 080101 9 10 0 0 586.1 0.6827 0.0 .0 0.0 0.0 0 1 2 0 0.0 0.0 1 0
92 080111 10 11 0 0 586.1 0.6827 0.0 .0 0.0 0.0 0 1 2 0 0.0 0.0 1 0
93 080111 10 11 0 0 586.1 0.6827 0.0 .0 0.0 0.0 0 1 2 0 0.0 0.0 1 0
CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.
94 080121 11 12 0 0 586.1 1.84 -13.96 .0 0.0 0.0 0 1 2 0 0.0 0.0 1 0
95 080131 12 13 0 0 586.1 2.826 -13.662 .0 0.0 0.0 0 1 2 0 0.0 0.0 1 0
96 080141 13 14 0 0 586.1 0.5144 -2.075 .0 0.0 0.0 0 1 2 0 0.0 0.0 1 0
97 080151 14 1 0 0 586.1 0.6827 0.0 .0 0.0 0.0 1 1 2 0 0.0 0.0 1 0
98 080161 14 15 0 0 0.0 0.6827 0.0 .0 0.0 0.0 1 1 3 0 0.0 0.0 1 0
99 080171 24 15 0 0 0.0 0.4176 0.0 .0 0.5 0.5 0 1 2 0 0.0 0.0 1 0
100 080181 15 16 0 0 0.0 0.09 0.0 .0 0.0 0.0 0 1 3 0 0.0 0.0 1 0
101 080191 16 17 0 0 0.0 0.09 2.354 .0 1.52 1.09 0 1 2 0 0.0 0.0 1 0
102 080201 17 18 0 0 0.0 0.206 11.228 .0 7.02 7.02 0 1 2 0 0.0 0.0 1 0
103 080211 18 19 0 0 0.0 0.09 2.354 .0 1.09 1.52 0 1 2 0 0.0 0.0 1 0
104 080221 19 20 0 0 0.0 0.09 -3.979 .0 17.1 17.1 0 1 2 0 0.0 0.0 1 0
105 080231 20 26 0 1 0.0 0.09 0.0 .0 0.0 0.0 1 1 3 0 0.0 0.57 1 0 1
106 080241 11 21 0 0 0.0 0.6827 0.0 .0 0.0 0.0 0 1 3 0 0.0 0.0 1 0
107 080241 11 21 0 0 0.0 0.6827 0.0 .0 0.0 0.0 1 1 3 0 0.0 0.0 1 0
CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.
108 080251 25 21 0 0 0.0 0.4176 0.466 .0 0.5 0.5 0 1 2 0 0.0 0.0 1 0
109 080261 21 27 0 0 0.0 0.09 0.0 .0 0.0 0.0 0 1 3 0 0.0 0.0 1 0
110 080271 22 23 0 0 0.0 0.0156 3.848 .0 0.0 0.0 0 1 3 0 0.0 0.57 1 0 1
111 080271 22 28 0 0 0.0 0.0156 3.848 .0 0.0 0.0 0 1 3 0 0.0 0.57 1 0 1
CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.
112 080271 22 28 0 0 0.0 0.0504 4.181 .0 0.0 0.0 1 1 3 0 0.0 0.57 1 0 1
CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.
113 080281 23 2 0 0 0.0 0.0156 0.466 .0 0.95 0.44 0 1 2 0 0.0 0.57 1 0 1
114 080291 27 26 0 1 0.0 0.09 0.0 .0 0.0 0.0 1 1 3 0 0.0 0.57 1 0 1
115 080301 28 23 0 0 0.0 0.0156 3.778 .0 0.0 0.0 0 1 3 0 0.0 0.57 1 0 1
116 080301 28 23 0 0 0.0 0.0156 3.778 .0 0.9 0.9 0 1 2 0 0.0 0.57 1 0 1
CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.
117 *
118 *      PUMP CURVE INPUT INDICATORS
119 100000 0 0 0 0
120 100000 16 0 0 16
CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.
121 *
122 *      PUMP DESCRIPTION
123 *
124 090011 1 3 1 1 3530. 0.6516 5000. 330. 443. 386. 48.02 110.7
125 090011 1 3 1 1 3530. 0.6516 5000. 330. 443. 294. 48.02 110.7
CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.
126 090021 1 3 1 1 3530. 0.6516 5000. 330. 443. 386. 48.02 110.7
127 090021 1 3 1 1 3530. 0.6516 5000. 330. 443. 294. 48.02 110.7
CARD ABOVE IS REPLACEMENT CARD.
128 *
129 *      PUMP HEAD MULTIPLIER
130 *
131 091001 -11 0. 0. .1 0. .15 .05 .24 .8 .3 .96 .4 .98
132 091002 .6 .97 .8 .9 .9 .8 .96 .5 1. 0.
133 *
134 *      PUMP TORQUE MULTIPLIER
135 *
136 092001 -7 0. 0. .1 0. .15 .05 .24 .56 .8 .56 .96 .45 1. 0.
137 *
138 *      PUMP HEAD AND TORQUE DATA
139 *
140 101011 1 1 6 0. 1.4036 .19061 1.3636 .38963 1.3186
141 101012 .59396 1.2328 .7902 1.1336 1. 1.0078
142 101021 1 2 8 0. -.67 .2 -.5 .4 -.25
143 101022 .57554 0. .74432 .2583 .77348 .3778
144 101023 .86313 .6326 1. 1.0078
145 101031 1 3 6 -1. 2.4722 -.80574 2.0474 -.6069 1.831
146 101032 -.40683 1.624 -.200171 1.4705 0. 1.4036
147 101041 1 4 8 -1. 2.4722 -.82297 1.9968 -.63332 1.5897
148 101042 -.45534 1.3279 -.27109 1.1949 -.17716 1.0605
149 101043 -.09073 1.0156 0. .934279

```



JAERI-M 7037

150	101051	1 5 7	0.		.25	.2	.28	.4	.34
151	101052		.4118	.2768	.59763	.4584	.763467	.6992	
152	101053		1.	.9465					
153	101061	1 6 10	0.	.934279	.091099	.9229	.186509	.8963	
154	101062		.271762	.875	.455872	.8433	.574406	.8355	
155	101063		.740576	.8466	.766619	.8469	.871471	.8838	
156	101064		1.	.9465					
157	101071	1 7 6	-1.	-1.	-.8	-.63	-.6	-.3	
158	101072		-.4	-.05	-.2	.15	0.	.25	
159	101081	1 8 6	-1.	-1.	-.8	-.97	-.6	-.95	
160	101082		-.4	-.88	-.2	-.8	0.	-.67	
161	101091	2 1 6	0.	.6032	.1930	.6325	.393	.7369	
162	101092		.59552	.8331	.79782	.9229	1.	.9672	
163	101101	2 2 7	0.	-.67	.4	-.25	.5	.15	
164	101102		.737255	.526586	.768049	.606594	.86723	.74366	
165	101103		1.	.9672					
166	101111	2 3 6	-1.	1.9843	-.80096	1.394	-.60638	1.0975	
167	101112		-.40686	.822	-.19928	.6648	0.	.6032	
168	101121	2 4 8	-1.	1.9843	-.82234	1.8308	-.63371	1.6824	
169	101122		-.45853	1.557	-.267023	1.4362	-.176107	1.3879	
170	101123		-.08931	1.3481	0.	1.23361			
171	101131	2 5 4	0.	-.45	.4	-.25	.5	0.	
172	101132		1.	.3569					
173	101141	2 6 10	0.	1.23361	.090643	1.1965	.188569	1.1096	
174	101142		.27347	1.0416	.458669	.8958	.57448	.7807	
175	101143		.73816	.6134	.76852	.5849	.870057	.4877	
176	101144		1.	.3569					
177	101151	2 7 4	-1.	-1.	-.3	-.9	-.1	-.5	
178	101152		0.	-.45					
179	101161	2 8 4	-1.	-1.	-.25	-.9	-.08	-.8	
180	101162		0.	-.67					
181	104011	1 1 7	0.	0.	.1 .83 .2	1.09 .5	1.02 .7	1.01 .9	.94 1. 1.
182	104021	1 2 8	0.	0.	.1 -.04 .2	0. .3 .1 .4	.21 .8	.67 .9	.8 1. 1.
183	104031	1 3 10	-1.	-1.16 -.9	-1.24 -.8	-1.77 -.7	-2.36 -.6	-2.79 -.5	2.91
184	104032		-.4	-2.67 -.25	-1.69 -.1	-.5 0.	0.		
185	104041	1 4 10	-1.	-1.16 -.9	-.78 -.8	-.5 -.7	-.31 -.6	-.17 -.5	-.08
186	104042		-.35	0. -.2	.05 -.1	.08 0.	.11		
187	104051	1 5 6	0.	0.	.2 -.34 .4	-.65 .6	-.93 .8	-1.19 1.	-1.47
188	104061	1 6 10	0.	.11 .1	.13 .25 .15	.4 .13 .5	.07 .6	-.04 .7	-.23
189	104062		.8	-.51 .9	-.91 1.	-1.47			
190	104071	1 7 2	-1.	0.	0.				
191	104081	1 8 2	-1.	0.	0.				
192	104091	2 1 6	0.	.6032	.193	.6325	.393	.7369	
193	104092		.59552	.8331	.79782	.9229	1.	.9672	
194	104101	2 2 7	0.	-.67	.4	-.25	.5	.15	
195	104102		.737255	.526586	.768049	.606594	.86723	.74366	
196	104103		1.	.9672					
197	104111	2 3 6	-1.	1.9843	-.80096	1.394	-.60638	1.0975	
198	104112		-.40686	.822	-.19928	.6648	0.	.6032	
199	104121	2 4 8	-1.	1.9843	-.82234	1.8308	-.63371	1.6824	
200	104122		-.45853	1.557	-.267023	1.4362	-.176107	1.3879	
201	104123		-.08931	1.3481	0.	1.23361			
202	104131	2 5 4	0.	-.45	.4 -.25	.5 0.	1.	.3569	
203	104141	2 6 10	0.	1.23361	.090643	1.1965	.188569	1.1096	
204	104142		.27347	1.0416	.458669	.8958	.57448	.7807	
205	104143		.73816	.6134	.76852	.5849	.870057	.4877	
206	104144		1.	.3569					
207	104151	2 7 4	-1.	-1.	-.3 -.9	-.1 -.5	0.	-.45	
208	104161	2 8 4	-1.	-1.	-.25 -.9	-.08 -.8	0.	-.67	
209	*								
210	*	VALVE DATA							
211	110010	-3 0.0 0.0 0.0 0.0							
212	*								
213	*	LEAK TABLE							
214	*								
215	120100	3 2 27.0	0.0 0.0	0.02 1.0	100.0 1.0				
216	120100	3 2 53.0	0.0 0.0	0.02 1.0	100.0 1.0				
217	150011	0 11 1	0 0.0	20.3 482.5	0.0 0.0				
218	170101	1 1 1	5 0.0	0.84 0.0					
219	180101	-2		* SS304 THERMAL CONDUCTIVITY					
220	180102	212.	9.574	2372.	19.294				
221	190101	-13		* SS304 HEAT CAPACITY					
222	190102	170.	44.46081	250.	44.32964	400.	44.48722		
223	190103	600.	45.39201	600.	46.90938	1000.	48.84131		
224	190104	1200.	50.99056	1400.	53.12869	1600.	55.14808		
225	190105	1800.	56.76090	2000.	57.79932	2200.	58.06550		
226	190106	2400.	57.36161						
227									

正誤表

頁	行	誤	正
17	Vol. 26	SV2-1 6	SV2-1~6
26	Fig. 3.4	NOZZLE	NOZZLE
26	Fig. 3.5	← →	← 11.188 →
30	Fig. 3.11	← →	← 11.188 →
35	Fig. 3.18	NOZZLE	NOZZLE
53	Table 1	Psi	psi