

JAERI-Tech
2000-007



JP0050321



RELAP5コードによる水銀流動基礎実験装置の過渡解析
(第3報) 水銀物性値を用いた過渡解析

2000年2月

木下秀孝・神永雅紀・日野竜太郎

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2000

編集兼発行 日本原子力研究所

RELAP5 コードによる水銀流動基礎実験装置の過渡解析
(第3報 水銀物性値を用いた過渡解析)

日本原子力研究所東海研究所中性子科学研究センター
木下 秀孝・神永 雅紀・日野 竜太郎

(2000年1月11日受理)

中性子科学研究計画を推進するため、5 MW 核破砕ターゲットシステムの設計を実用的中性子性能と安全性確保の観点から進めている。安全性に関しては、ターゲットシステムの異常事象時の過渡挙動を把握し、それらの事象を早期に検出して安全に収束させるための安全保護系の概念構築が急務となっている。本報では、水銀流動基礎実験装置の異常事象を想定した過渡解析を、水銀物性値を用いて行った結果について述べる。既存の水銀流動基礎実験装置によって測定した圧力データを基に、解析モデルを修正し、水銀流動基礎実験装置の定常状態での圧力分布を再現できるようにして、強制流動喪失と冷却材流出を模擬した過渡解析を行った。強制流動喪失時には、慣性力のある機械式ポンプと電磁式ポンプの場合について検討したが、水銀を流体とした場合には、流動している水銀の持つ慣性力が水に比べ約 13.5 倍（密度比）と大きく、ポンプの慣性力の違いによるポンプ停止後の流量低下特性に有意な違いはみられないことを明らかにした。また、小口径の配管破損による冷却材流出時には、急激な圧力変動が起こりにくいことが明らかとなり、今回の解析のような微少な圧力変動を基にシステムの異常を検出する必要があることがわかった。今後は、今回の解析結果を基に同一条件での検証実験を行い、さらに実規模システムについての解析を進める予定である。

Transient Analysis of Mercury Experimental Loop using the RELAP5 Code
(3rd Report, Transient Analysis using Mercury Properties)

Hidetaka KINOSHITA, Masanori KAMINAGA and Ryutaro HINO

Center for Neutron Science
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 11, 2000)

In order to promote the Neutron Science Project of JAERI, the design of a 5MW-spallation target system is in progress with the purpose of producing a practical neutron application while at the same time adhering to the highest levels of safety. To establish the safety of the target system, it is important to understand the transient behaviors during anticipated operational events of the system, and to design the safety protection systems for the safe termination of the transients. This report presents the analytical results of transient behaviors in the mercury experimental loop using mercury properties. At first, the analytical pressure distributions were compared with experimental data measured with the mercury experimental loop. The modeling data were modified to reproduce the actual pressure distributions of the mercury experimental loop. Then a loss of forced convection and a loss of coolant accident were analyzed. In the case of the pump trip, the transient analysis was conducted using two types of mercury pumps, the mechanical type pump with moment of inertia, and the electrical-magnetic type pump without moment of inertia. The results show there was no clear difference in the two analyses, since the mercury had a large inertia, which was 13.5 times that of the water. Moreover, in the case of a pipe rupture at the pump exit, a moderate pressure decrease was confirmed when a small breakage area existed in which the coolant flowed out gradually. Based on these results, it was appeared that the transient fluctuation of pressure in the mercury loop would not become large and accidents would have to be detected by small fluctuations in pressure. Based on these analyses, we plan to conduct a simulation test to verify the RELAP5 code, and then the analysis of a full-scale mercury system will be performed.

Keywords : Spallation Target, RELAP5, Mercury Loop, Modeling, Safety Analysis,
Loss of Forced Convection, Loss of Coolant Accident, Safety Protection System

目 次

| | |
|---------------------------|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. 水銀流動基礎実験装置の概要と解析条件 | 2 |
| 2. 1 水銀流動基礎実験装置 | 2 |
| 2. 2 解析条件 | 2 |
| 3. 定常解析とモデルの修正 | 4 |
| 3. 1 予備解析用データによる定常解析 | 4 |
| 3. 2 入力データの修正 | 4 |
| 3. 3 修正後の入力データによる定常解析 | 5 |
| 3. 4 テストセクション加熱時の定常解析 | 5 |
| 4. 異常事象時の過渡解析 | 6 |
| 4. 1 ポンプ停止に伴う強制流動喪失 | 6 |
| 4. 2 配管破損による冷却材喪失事故(LOCA) | 7 |
| 5. 今後の予定 | 9 |
| 6. まとめ | 9 |
| 謝 辞 | 10 |
| 参考文献 | 10 |

CONTENTS

| | |
|--|----|
| 1. Introduction | 1 |
| 2. Outline of Mercury Experimental Loop and Analysis Condition | 2 |
| 2. 1 Mercury Experimental Loop | 2 |
| 2. 2 Analysis Condition | 2 |
| 3. Steady-State Analysis and Modification of Loop Model | 4 |
| 3. 1 Steady-state Analysis using Preliminary 's Model | 4 |
| 3. 2 Modification of Input Modeling Data | 4 |
| 3. 3 Steady-State Analysis using Modified Model Data | 5 |
| 3. 4 Steady-State Analysis with Test Section Heating | 5 |
| 4. Transient Analysis of Anticipated Accident | 6 |
| 4. 1 Transient Analysis during Loss of Forced Convection | 6 |
| 4. 2 Loss of Coolant Accident (LOCA) | 7 |
| 5. Future Plan | 9 |
| 6. Concluding Remarks | 9 |
| Acknowledgement | 10 |
| Reference | 10 |

Figures and Photos

| | | |
|------------|--|----|
| Photo.2.1 | Mercury loop. | 11 |
| Fig.2.1 | Schematic drawing of mercury experimental loop instrumentation | 11 |
| Fig.3.1 | RELAP5 simulation results obtained with an initial condition of constant pressure | 12 |
| Fig.3.2 | Temperature and pressure distributions in mercury experimental loop under steady-state situation before modification. | 12 |
| Fig.3.3 | Temperature and pressure distributions in mercury experimental loop under steady-state situation after modification | 13 |
| Fig.3.4 | Temperature and pressure distributions in mercury experimental loop under steady-state situation with test section heating | 13 |
| Fig.4.1(a) | Pressure and velocity changes during loss of forced convection caused by pump trip. (Moment of pump inertia : $281.25 \text{ N}\cdot\text{m}^2$) | 14 |
| Fig.4.1(b) | Temperature and velocity changes during loss of forced convection caused by pump trip. (Moment of pump inertia : $281.25 \text{ N}\cdot\text{m}^2$) | 14 |
| Fig.4.2(a) | Pressure and velocity changes during loss of forced convection caused by pump trip. (Moment of pump inertia : $0.536 \text{ N}\cdot\text{m}^2$) | 15 |
| Fig.4.2(b) | Temperature and velocity changes during loss of forced convection caused by pump trip. (Moment of pump inertia : $0.536 \text{ N}\cdot\text{m}^2$) | 15 |
| Fig.4.3(a) | Pressure and velocity changes during loss of forced convection caused by pump trip. (Moment of pump inertia : $281248 \text{ N}\cdot\text{m}^2$) | 16 |
| Fig.4.3(b) | Temperature and velocity changes during loss of forced convection caused by pump trip. (Moment of pump inertia : $281248 \text{ N}\cdot\text{m}^2$) | 16 |
| Fig.4.4(a) | Pressure and velocity changes during loss of coolant accident (LOCA). (Diameter of valve open area: 1.0mm) | 17 |
| Fig.4.4(b) | Temperature and velocity changes during loss of coolant accident (LOCA). (Diameter of valve open area: 1.0mm) | 17 |
| Fig.4.5(a) | Pressure and velocity changes during loss of coolant accident (LOCA). (Diameter of valve open area: 5.0mm) | 18 |
| Fig.4.5(b) | Temperature and velocity changes during loss of coolant accident (LOCA). (Diameter of valve open area: 5.0mm) | 18 |
| Fig.4.6(a) | Pressure and velocity changes during loss of coolant accident (LOCA). (Diameter of valve open area: 10.0mm) | 19 |
| Fig.4.6(b) | Temperature and velocity changes during loss of coolant accident (LOCA). (Diameter of valve open area: 10.0mm) | 19 |
| Fig.4.7(a) | Pressure and velocity changes during loss of coolant accident(LOCA). (Diameter of valve open area: 25.0mm) | 20 |

| | | |
|------------|--|----|
| Fig.4.7(b) | Temperature and velocity changes during loss of coolant accident (LOCA). (Diameter of valve open area: 25.0mm) ······ | 20 |
| Fig.5.1 | Schematic flow diagram of remodeled mercury experimental loop for piping rupture test ······ | 21 |

1. はじめに

中性子科学研究計画では、5MW 規模の中性子散乱施設用核破碎ターゲットとして、熱除去などの優位性を考慮して水銀ターゲットを用いる予定である。このため、ターゲットシステムの設計では、メインループとなる水銀循環系統や付帯するビーム窓冷却用重水循環系統の機器構成及び仕様を定めるとともに、強制流動喪失や冷却材流出等の異常時における流量・圧力の過渡変化等、システムの挙動を把握して、事故時の異常を早期に検出し収束させることによって安全に対処できるような安全保護系を設計して、システム全体の安全性を確保する事が極めて重要である。そこで、安全解析コード“RELAP5”を用いて、水銀ターゲット及びその循環系（水銀ループ）の安全解析を行い、システムの過渡挙動を明らかにし、安全保護系及び制御系の設計に反映させることを立案した。

水銀を用いたシステムの解析手法を確立するため、水銀ループの小型版（実機流量の約 1/60）である水銀流動基礎実験装置をモデル化して、RELAP5 コードに組み込まれている軽水の物性値を用いて予備解析を行った⁽¹⁾。予備解析により、強制流動喪失や冷却材流出等の事故時における圧力変動及び温度変化の挙動を把握し、その結果を参考にして過渡的な実験が行えるよう実験装置の改造に着手した。これを踏まえて、水銀蒸気表及びそれに関連した水銀物性値を計算するサブルーチンの作成を行い、RELAP5 によって水銀物性値を用いた解析が行えるようプログラムを整備し、試解析によって計算が正常に実行できることを確認した⁽²⁾。

本報では、水銀物性値を取り扱えるよう整備した RELAP5 を用いて、水銀流動基礎実験装置における、ポンプ停止に伴う強制循環喪失時及び冷却材流出事故（LOCA）時の流量、圧力等の過渡挙動について解析的に検討した結果を示す。

2. 水銀流動基礎実験装置の概要と解析条件

2.1 水銀流動基礎実験装置

ターゲット開発室では、中性子散乱施設に設置する水銀ターゲット循環系となる水銀ループの設計に必要な、水銀の流動特性や運転のデータ取得を目的とした、小型の水銀ループ「水銀流動基礎実験装置」を製作した⁽³⁾。本実験装置は、圧力損失特性や壁面のエロージョン等のデータを得るため、テストセクションにおける水銀流速が実機の水銀ターゲット内での最大設計流速である 1.0m/s を十分にカバーできるように設計・製作されている。

水銀流動基礎実験装置の構成を Fig.2.1 に模式的に示す。実験装置は、同心2重円管テストセクション（外管内径 25mm、内管外径 20mm）、アルゴンガスによって流体を加圧して一定圧に保つ膨張ポット、プレート式熱交換器、電磁ポンプ及び電磁流量計で構成され、各機器を SUS316 製の 25A 管（外径 34mm、内径 25mm）で接続した閉ループである。ループの配管全長は約 11m で、テストセクションは約 1m、圧力を測定するセンサー間は 640mm である。装置全体の概観を Photo.2.1 に示す。水銀及び水銀蒸気の外部への流出を防ぐため、ループの周囲をアクリル板及び鋼鉄製のトレイで囲み、内部の空気は水銀蒸気を吸着させるチャコールフィルターを通してファンで吸引排気するようにしている。

装置の主要な仕様は以下の通りである。

| | | |
|-------|---|---|
| 定格流量 | : | 15 l/min (2.50×10^{-4} m ³ /s) |
| 水銀充填量 | : | 最高 400kg (約 30 リットル)、現在は約 270kg (20 リットル) 充填 |
| 主要材質 | : | SUS316 |
| 使用圧力 | : | ~0.5MPa (水銀注入時、加圧充填)、~0.4MPa (試験運転中) |
| 使用温度 | : | 最高 353.15K (80°C) |

2.2 解析条件

RELAP5 による解析初期条件として、水銀流動基礎実験装置の通常運転条件である以下の条件を与えた。温度及び圧力は熱交換器を除いて一定とした。

| | | | |
|-------|---|-----------|----------------|
| 流体温度 | : | 熱交換器以外の部分 | 303.15K (30°C) |
| | | 熱交換器 | 298.15K (25°C) |
| 圧力 | : | 0.35MPa | |
| 流体の種類 | : | 水銀 | |

RELAP5 でモデル化が可能なポンプは機械式の遠心ポンプであり、回転数によって発熱量（流体への入熱量）が変化する。水銀流動基礎実験装置では水銀循環用に電磁ポンプ (EMP) を使用して

いるため、解析では EMP の Q-H カーブを遠心ポンプに置き換えて模擬し、EMP の温度上昇に等しくなるよう定格回転数を設定した。

実験装置に設置したテストセクションは現在のところ非加熱であるが、加熱された場合の温度変化を調べるためにテストセクションの加熱を模擬して解析を行った。加熱時のテストセクションにおける発熱量は、過渡変化時に有意な温度変化が観察できるように、定常時においてテストセクション出入口温度差が 10℃以上となるように以下の条件を与えた。

加熱長さ： 940mm

発熱量： 5000W/m

上記の初期条件を与えて定常状態における圧力分布等を計算して、この計算結果を定常状態の初期条件として、ポンプ停止による強制循環喪失事故時等の過渡変化解析を行った。

3. 定常解析とモデルの修正

3.1 予備解析用データによる定常解析

Fig. 3.1 に、テストセクションが非加熱の場合における定常状態設定時の圧力及び流速変動を時間に対して示す。解析条件は 2.2 節で述べたように膨張ポットでの圧力を 0.35 MPa とし、流体(水銀)温度は初期状態で 303.15K (30°C) に設定した。解析に用いた入力データは第 1 報⁽¹⁾で用いたものである。解析開始時に、大きな圧力変動が見られるが、これは、初期条件で温度及び圧力を一定としているため、各セクションでの流速と圧力損失のバランスがとれていないことが原因と考えられる。しかし、この圧力上昇も 10 秒程度でおさまり、その後は一定値を保っている。このことから、10 秒以降においては定常状態に達していることが分かる。この条件で、600 秒経過後のループ内圧力及び温度分布を Fig. 3.2 に示す。図には、膨張ポット圧力及びテストセクション流速が解析と同一条件の場合の、水銀流動基礎実験装置で測定したループ内の圧力を併せて示した。測定箇所は、Fig.2.1 に示したように、テストセクションの出入口とポンプ入口手前の配管の計 3 カ所である。圧力は配管の摩擦損失及びエルボ等の形状損失などにより下流に向かって低下していくが、途中圧力が上昇するのは第 1 報でも述べたとおりループの垂直方向の高低差により静圧が変化するためである。解析値と実験値を比較するとテストセクションでは解析値が低く、ポンプ手前では実験値が低くなっていることが分かる。これは、テストセクションとポンプの間にある膨張ポット及び熱交換器内での圧力損失が、小さく評価されていることによるものと考えられる。

3.2 入力データの修正

上述したように、現行のモデルでは定常状態における解析値と実験値は若干異なっているため、水銀流動基礎実験装置における圧力損失をより高精度に模擬できるように、各流体要素の繋ぎ目における抵抗係数等を変更修正した。以下に変更修正点について記す。変更修正は、各機器の内部の流れや構造をより詳細にモデル化することを基本方針として行った。

(1) 膨張ポット

入口及び出口での抵抗係数は考慮していなかったが、出入口での方向変化及び内部で流速が 0 近くまで低下することを考慮して抵抗係数を変更した。

(2) 熱交換器

入口及び出口での抵抗係数は単純な曲がり管として設定していたが、流路形状変化や面積変化を解析モデルに加えた。また、壁面粗さについては、内部の突起による伝熱促進を仮定して 1.5mm とした。

(3) 電磁ポンプ及び電磁流量計

ポンプ及び流量計部はそのほかの部分のパイプに比べ流路直径が大きくなるため、実機を忠実に模擬できるように流路面積急変モデルを出入口部のジャンクションに設定した。

(4) テストセクション

テストセクション出入口部に、実機を模擬するための流路面積急変モデルを適用した。

以上の修正は今回の解析をより高精度化するために行ったものであり、今後の実験により各機器の圧力損失等がさらに明確になった時点で随時修正していく。

3.3 修正後の入力データによる定常解析

Fig.3.3 に、3.2 節で変更修正した入力データにより解析したループ内圧力分布を示す。解析結果は、実験で測定したテストセクション及びポンプ手前の配管における圧力との差は $\pm 1.0\%$ の範囲であり、今回の入力データの修正が極めて妥当であるといえる。解析においては、各流体要素での圧力損失が多くなった分、ポンプでの昇圧を大きくして所定の流量が流れるように入力データを修正した。

3.4 テストセクション加熱時の定常解析

Fig.3.4 に 3.2 節で変更修正した入力データを用いて、テストセクションを加熱した場合の定常解析を 600 秒間行った後の水銀流動基礎実験装置内の温度及び圧力分布を示す。ポンプの回転数は、実験時における EMP 出入口の温度差約 6 K に合うよう 22.5rpm とした。テストセクションにおける温度上昇は約 13K で、ポンプ及びテストセクションでの温度上昇分は熱交換器で冷却されて定常を保っている。圧力分布に関しては非加熱時の圧力分布と大きな違いは生じていない。次章の過渡解析においては、ここで得られた温度及び圧力分布を計算開始時の初期入力データとして用いる。

4. 異常事象時の過渡解析

4.1 ポンプ停止に伴う強制流動喪失

水銀等の液体金属を流動させるポンプとしては電磁ポンプが一般的であるが、ポンプの小型化やコスト低減等の観点からは遠心ポンプ等の機械式ポンプが考えられる。そこで、今回の解析においては、これら2種類のポンプを用いた場合におけるポンプ停止時の過渡挙動の違いについて検討した。ポンプの特性、特にポンプ停止時の挙動についてはポンプの慣性モーメント(GD^2)によって決まる。RELAP5では遠心ポンプモデルがコードに組み込まれているため、電磁ポンプをモデル化するに当たっては、ポンプの慣性モーメントを電磁ポンプが模擬できるように設定して解析を行った。

慣性モーメントは以下の式により計算される。

$$GD^2 = \frac{4tT}{\omega}$$

t [s]は慣性時定数（軸動力を切ってからポンプ回転数が半分になるまでの時間）、 T [$N \cdot m$]は定格トルク ($974.4 \times$ 軸動力 [kW] $\times g$ (重力加速度) [m/s^2] / 回転数 [rpm])、 ω [rad/s]は角速度を表す。

機械式ポンプについては、一般的な遠心ポンプの停止時定数 0.5 秒に相当する慣性モーメント ($281.25N \cdot m^2$) を入力した。電磁ポンプについては、機械式ポンプと違い回転機器を用いないためポンプ慣性モーメントは0であるが、RELAP5では慣性モーメント0では計算できないため、時定数を0.001秒と極めて0に近い値に設定し、その場合の慣性モーメント ($0.536N \cdot m^2$) を入力して電磁ポンプを模擬した。解析のシーケンスは、定常状態設定後にポンプが停止し、その後、テストセクション流速が定格値の85%に達したときにアラームを発信し、その0.1秒後にテストセクションの加熱停止を実行するという条件で行った。

Fig.4.1に機械式ポンプを用いた場合の圧力、流速及び温度の時間変化を示す。圧力及び流速はポンプ停止とともに急速に低下し、流速は20秒程でほぼ0まで低下している。ポンプ停止とほぼ同時に加熱も停止しているため温度はほとんど上昇していないが、温度がピーク値に達するまでの上昇速度は、後述のポンプの慣性を大きくした場合に比べて速くなっている。一方、ピーク値をすぎからの温度変化は、水銀の流速がポンプの停止に伴い急速に低下して冷却効果が低くなっているものの、テストセクションの加熱が既に停止しているために、緩やかに低下している。

Fig.4.2に電磁ポンプを用いた場合の圧力、流速及び温度の変化を示す。機械式のポンプと同様に、圧力及び流速はポンプ停止とともに急速に低下し、流速は20秒程でほぼ0まで低下しており、Fig.4.1に示した機械式ポンプの場合と比較して有意な違いがみられない。流量の変化がFig.4.1に示した機械式ポンプの場合と同様のため、温度についても前述の機械式ポンプの場合と同様な傾向を示している。

以上、一般的な慣性モーメントを持つ機械式ポンプと電磁ポンプの比較については、ポンプトリップ後の流量低下特性に有意な違いがみられなかった。このため、圧力、温度及び流速の時間変化はいずれの場合にも同様な傾向を示した。これは水銀の流動慣性力が同一流速の水に比べ約13.5倍（密度比）と大きく、かつ、ポンプの回転モーメントに比べて相対的に大きくなるために、上記の2条件 ($281.25N \cdot m^2$, $0.536N \cdot m^2$) でのポンプ慣性モーメントでは流動停止特性に影響を与えな

いものと考えられる。

次に、どの程度の慣性モーメントを与えればポンプ停止後の流速の低下に影響を与えるかを確認するため、その1例として、慣性モーメントを3桁ほど大きなもの(281548N・m²)にして解析を行った。その解析結果を Fig.4.3 に示す。圧力は、ポンプ停止による流速の低下とともに緩やかに下降し始めるが、流速が85%程度に低下したところで出入口双方ともに0.01MPa程度急速に上昇している。しかし、ポンプ停止後に流速が定格値の85%以下まで減少すると加熱を停止するシーケンスを組み込んでいるため、加熱停止とともに圧力は低下している。Fig.4.3(b)に示す温度は、流速の低下に伴い上昇し始めるが、流速が定格値の85%に達した時点で加熱が停止するため、その後に急速に低下している。これは、加熱停止後も一定程度の流速が維持されているために冷却が継続して行われているからである。圧力と温度の関係から、加熱停止前の圧力上昇は系全体の温度上昇が主要因と考えられる。また、流速についてはポンプ停止後100秒で約0.44m/s、図には示していないが300秒を経過しても0.2m/s程度の流速を維持している。よって、ポンプの慣性モーメントが流速低下に影響を与えるようなポンプではポンプトリップ後にも流速がある程度維持されるため、系全体の冷却性能を維持できる可能性が高い。しかしながら、小型ポンプにこのような大きな回転慣性を持たせることは現実的ではなく、水銀を流体とした場合には機械式ポンプ(遠心ポンプ)と電磁ポンプとでは、水銀の流動停止特性に有意な差はないものと考えられる。

4.2 配管破損による冷却材喪失事故(LOCA)

定常運転時にポンプ出口の配管に初期の欠陥等に起因して亀裂などの穴があいた場合(配管破損)を想定した冷却材流出事故(LOCA)について、分岐配管に設けたバルブを瞬時に開放することで模擬した入力データを用いて解析を行った。解析では、穴の大きさによる圧力、速度、流量の変化を把握するために、小口径から大口径までの破損を1mm、5mm、10mm及び25mmの4種類のバルブ開口部直径(開口径)で模擬した。なお、水銀ループ主配管内径は25mmである。また、破損位置については、Fig.2.1に示すドレンタンクへの分岐管の接続部とした。解析では、定常状態からバルブを瞬時に開き、テストセクション入口圧力が設定圧力の約40%である0.15MPaまで低下したときに加熱及びポンプトリップ信号を発信して、30秒の遅れ時間をもって加熱及びポンプが停止するよう設定した。圧力伝送器からの信号により加熱及びポンプを停止する場合、1秒程度の遅れ時間を仮定すれば十分であるが、ここでは圧力伝送器の故障等を想定して、膨張ポットの液位変化からトリップ信号を発信するなど、種々の要因を含めて極めて安全側の30秒の時間遅れを与え、より厳しい状態で解析を行うこととした。また、ポンプは前節で示した機械式ポンプを用いたシステム構成とした。

解析結果を Fig.4.4~Fig.4.7 に示す。Fig.4.4 に示した開口径が1mmの場合、事故発生直後にテストセクションの流速は僅かに(0.02m/s程度)低下するが、その後一定値を保っている。一方、圧力は時間とともに低下するものの、その低下割合は緩やかであり、破損事故発生後170秒を経過しても0.35MPa以上の圧力を維持している。この結果から、開口径1mm程度の微小な破損は事故発生からかなり時間が経過しないと圧力変化により破損を検知できないことが分かる。温度は流速が大

大きく変動しないためほぼ一定値を保っている。また、破損部での流速は極めて小さく、 7.1×10^{-3} m/s 程度である。本解析では、圧力の低下が続いているものの、破損発生後、流速・温度ともに第2の定常状態に達しているため170秒で解析を終了した。

Fig.4.5 に示した開口径が5mmの場合には、テストセクションの流速は一旦0.7m/s程度まで低下するが、ポンプの回転が停止していないため流速は徐々に上昇している。一方、圧力は約70秒後で約0.2MPaまで低下しており、圧力の低下速度は開口径1mmの場合に比べて大きくなっている。温度は流速が低下してある程度回復するまで上昇するが、流速の回復とともにゆっくりと低下している。このとき、破損部の流速は0.2m/s程度である。本解析では、圧力の低下は続いているものの、一旦低下したテストセクションの流速が回復することにより、テストセクション出入口の水銀温度が極大値を経た後低下し、その後上昇する要因は考えられないことから、70秒後に解析を終了した。

Fig.4.6 に示した開口径10mmの場合には、圧力は約30秒程で加熱及びポンプトリップの設定圧力0.15MPaとなりその約7秒後には膨張ポット内の全水銀が流出したため解析を停止した。テストセクションでの流速は約0.7秒の間に -0.5 m/s(逆流)に至っている。しかし、この時点ではポンプがまだ運転を継続しているため、流速は0.5m/s程度まで緩やかに回復している。テストセクションの温度は出口部において約54秒で最大368K(約55K上昇)まで上昇するが、流速の回復とともに低下し始めている。一方、破損部流速は、0.4秒ほどで最大0.64m/sに達し、その後、徐々に低下する傾向にある。

Fig.4.7 に示した開口径が25mmの場合には、圧力はテストセクション出入口ともに、ほぼ10秒で大気圧まで低下し、その間に膨張ポット内の水銀がすべて流出する。テストセクションの流速は約0.6秒で -2.6 m/sと大きな逆流を生じ、開口部からの流出流速も0.55秒の間に1.7m/sに達している。温度に関しては、テストセクション入口部において15℃程度の上昇がみられるが、逆流の流速が大きいため解析範囲では大きな温度上昇には至っていない。なお、解析は約13.6秒後に膨張ポット内の全水銀が流出したため停止した。

以上、水銀のLOCA時の過渡変動についての解析結果と、第1報に示した水の場合の解析結果を比べると、水銀の場合の方が流出時のテストセクションにおける流速の変動が小さく、水の場合に見られた周期的な細かな圧力変動を伴わないことが明らかになった。しかし、水銀流出時の流速・圧力変動が小さい分、これらを検知するためには検出機器の精度が要求される。とくに、ターゲットビーム窓等に発生することが予想される微少な亀裂から水銀が徐々に流出する場合、速度変化や圧力変動も極めて小さいものと考えられるため、水銀の漏洩を早期に検知する手法の開発は非常に重要な課題である。現在、膨張ポットの微少な液位変化を高精度、かつ、高速に検知するレーザー液位検出方式の検討を進めている。

5. 今後の予定

今後は水銀流動基礎実験装置を用いて、今回実施したシミュレーション解析を模擬した実験を行い、解析結果の検証を行うとともに、実験により得られた熱伝達相関式等を RELAP5 コードに組み込んで整備する。さらに、実機システムの解析を行い、流量低下や圧力変動などの異常時に、ターゲットシステムを保護する安全保護系におけるビームトリップ信号を発信すべき流量・圧力・水銀温度等を設定する。

Fig.5.1 に、模擬実験を行うために改造した水銀流動基礎実験装置の配管図を示す。ポンプ出口付近での管破損を模擬するために、斜線で囲まれた部分の配管等を増設した。今回の解析条件での実験を行うために、流出面積を調節する W032 と、ガス圧によって瞬時に開放する W033(ピストンバルブ)の2つのバルブを、主流路からドレンタンクへのパイプ間に設置した。W033 にはアルゴンガスポンプからガスを供給するように配管を改造した。以上の改造の他にも、図に示したように、配管の破損位置の違いによる影響を調べるため、膨張ポット出口側及びポンプ入口側の2カ所についても同様の改造を行った (W028,029、W030,031)。さらに、今回の改造時に機械式ポンプであるギアポンプを電磁ポンプと並列に設置したので、ギアポンプの流動特性も併せて測定する予定である。なお、前述したレーザー液位検出器を取り付けた改良型膨張ポットについても、確証試験を行う予定である。

また、現時点では水銀を流体としたターゲットシステムの過渡変化時及び事故時の安全性を判断するための基準を決定していないが、今後の解析評価及び実験を通して、安全判断基準を確立していく。

6. まとめ

RELAP5 により実規模水銀ループのシミュレーション解析を行うため、水銀流動基礎実験装置の解析モデルを作成して定常状態を設定し、ポンプトリップによる強制流動喪失や配管破損を模擬した冷却材流出事故時の解析を行った。ポンプ停止時には、水銀を流体とした場合、流動している水銀の持つ慣性力が水に比べ約 13.5 倍 (密度比) と大きく、水の場合にみられた慣性力のある機械式ポンプと電磁ポンプの違いがみられなかった。また、配管破損による冷却材流出事故時には直径 1mm 程度の小さな開口部であれば、圧力降下や流出も緩やかであるが、それゆえに、検出が非常に難しくなることがわかった。このような過渡変化が実際に生じた場合のシステム挙動を、水銀流動基礎実験装置を用いた模擬実験により測定し、検証する予定である。

謝 辞

RELAP5による解析を行うに当たり、原子炉安全工学部熱水力安全研究室の浅香英明氏に貴重な助言とともに多大な支援をいただきました。また、RELAP5コードへの水銀物性値組み込みに当たっては、(株)IEAJ 前田俊哉氏に多大なご協力をいただきました。さらに、本報告書をまとめるに当たっては、核熱利用研究部の稲垣嘉之氏から貴重なご助言をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 木下秀孝、神永雅紀、日野竜太郎, “RELAP5コードによる水銀流動基礎実験装置の過渡解析 (第1報 モデル化と予備解析)”, JAERI-Tech 98-061,(1999-1)
- (2) 木下秀孝、神永雅紀、日野竜太郎, “RELAP5コードによる水銀流動基礎実験装置の過渡解析 (第2報 水銀物性値の整備と試解析)”, JAERI-Tech 99-017,(1999-3)
- (3) 神永雅紀、木下秀孝、羽賀勝洋、日野竜太郎、数土幸夫, “水銀流動基礎実験 (第1報 壁面摩擦係数測定試験及び今後の試験計画)”, JAERI-Tech 99-051,(1999-7)

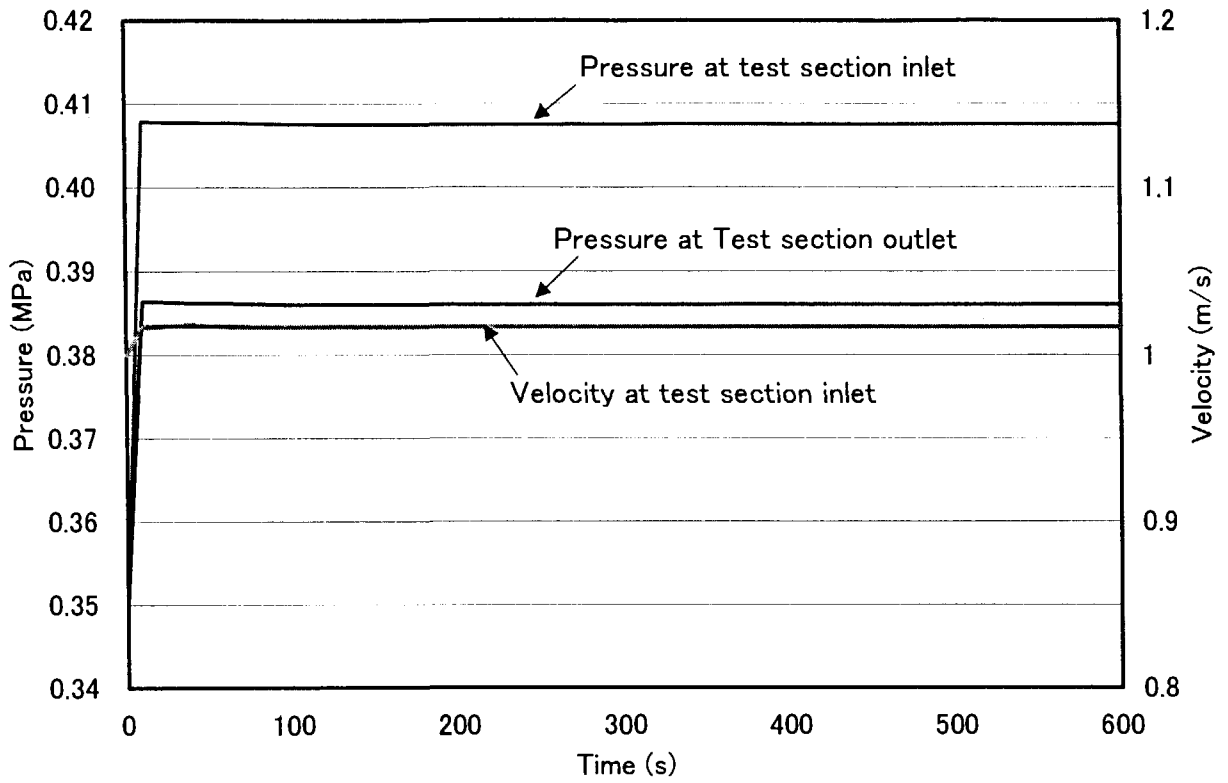


Fig. 3.1 RELAP5 simulation results obtained with an initial condition of constant pressure

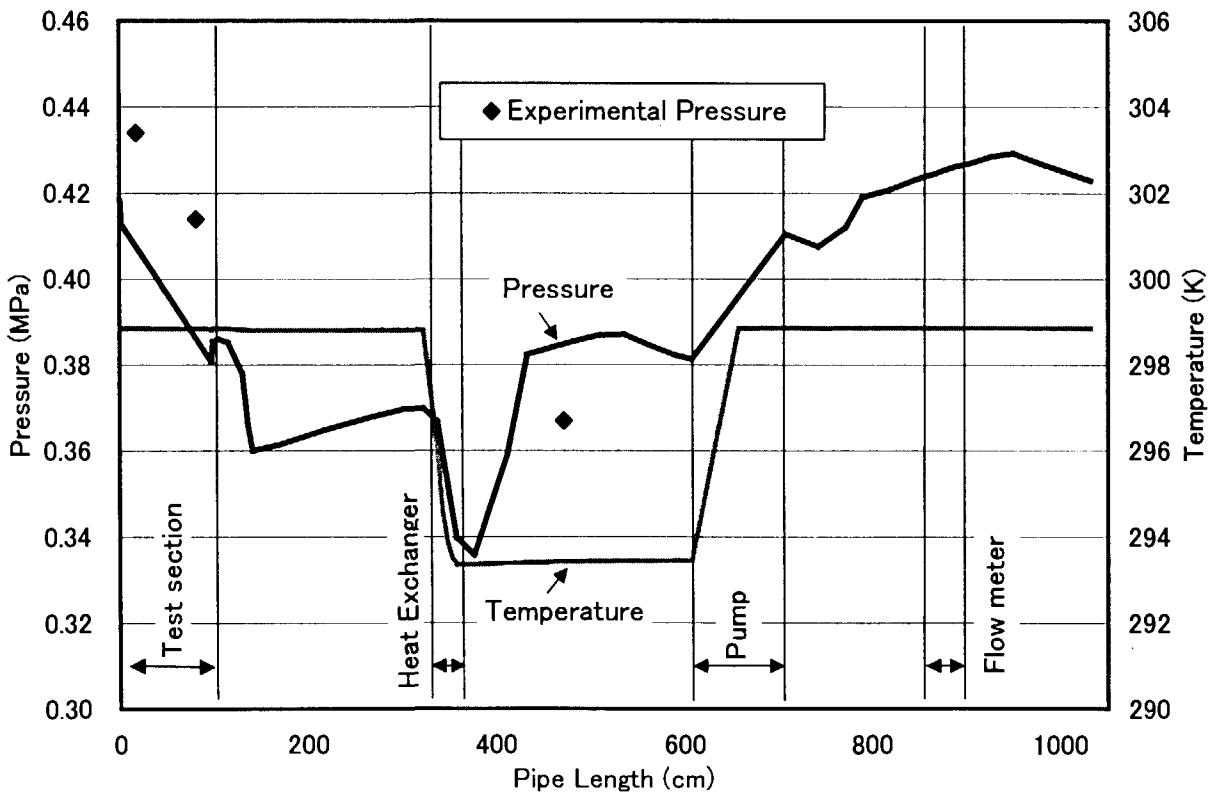


Fig.3.2 Temperature and pressure distributions in mercury experimental loop under steady-state situation before modification

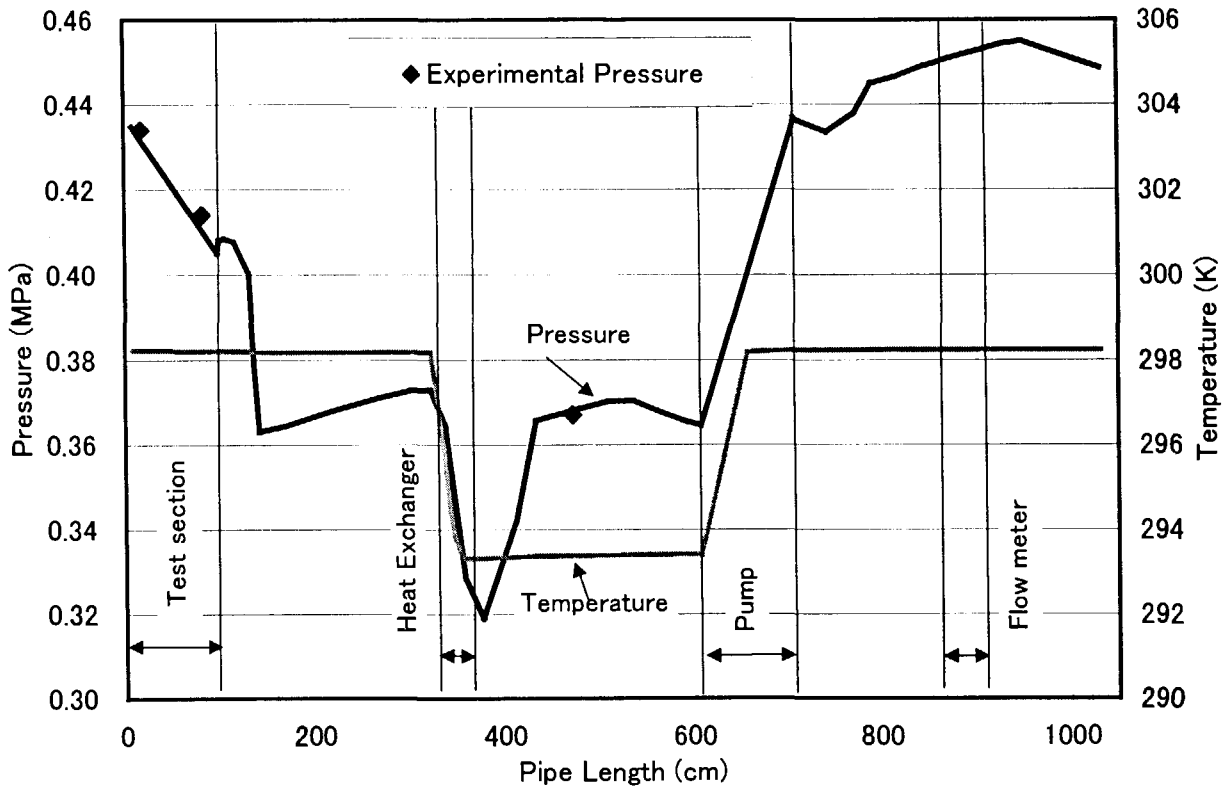


Fig.3.3 Temperature and pressure distributions in mercury experimental loop under steady-state situation after modification

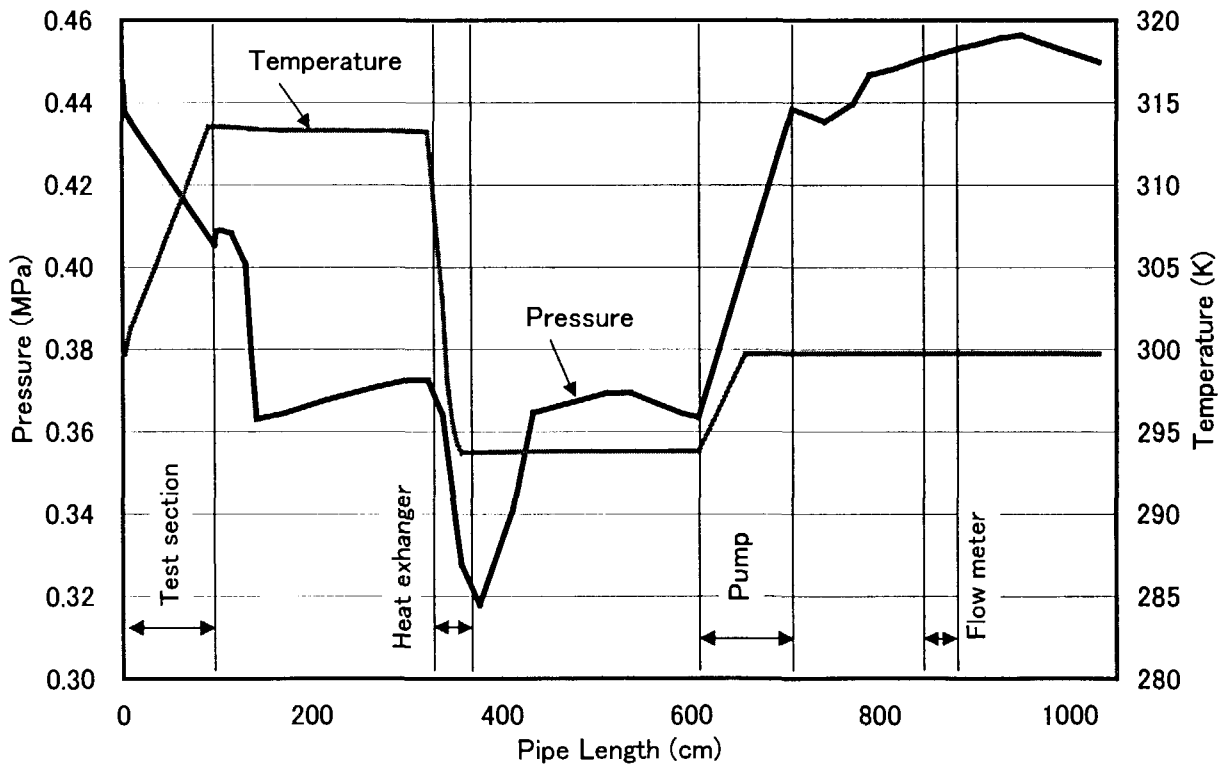


Fig.3.4 Temperature and pressure distributions in mercury experimental loop under steady-state situation with test section heating

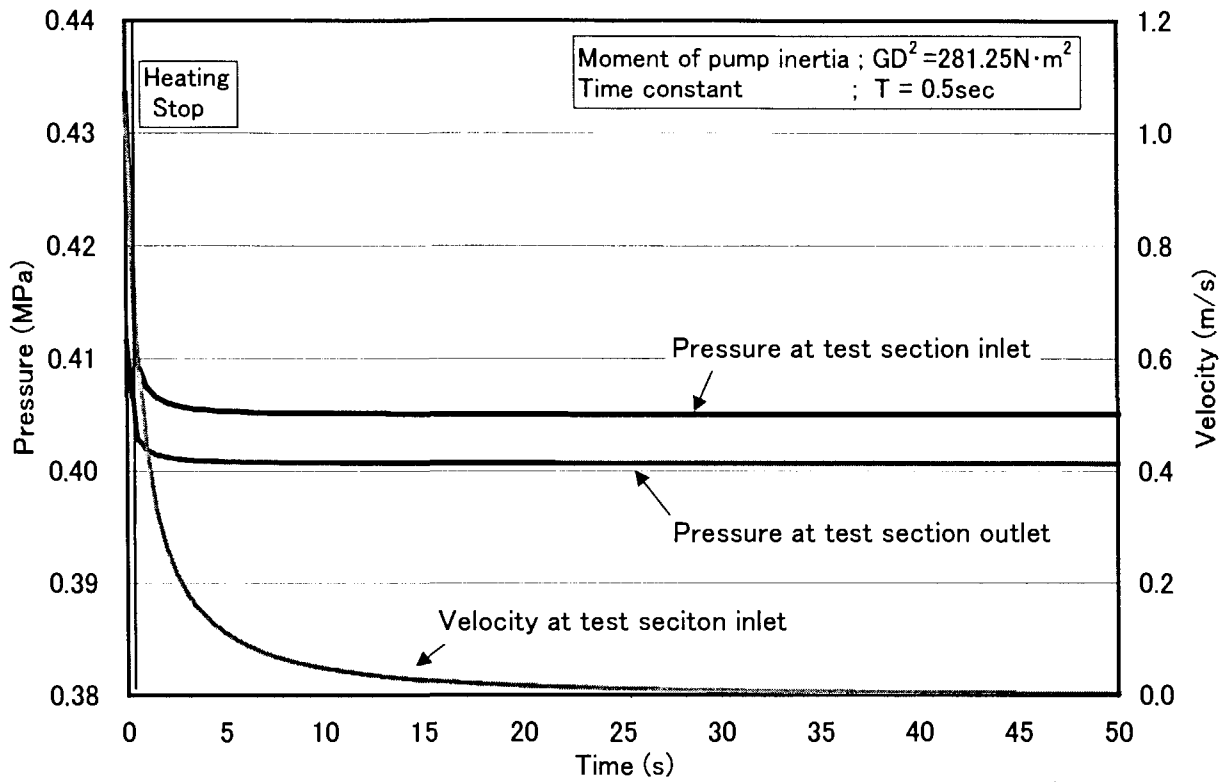


Fig.4.1(a) Pressure and velocity changes during loss of forced convection caused by pump trip (Moment of pump inertia : $281.25 \text{ N}\cdot\text{m}^2$)

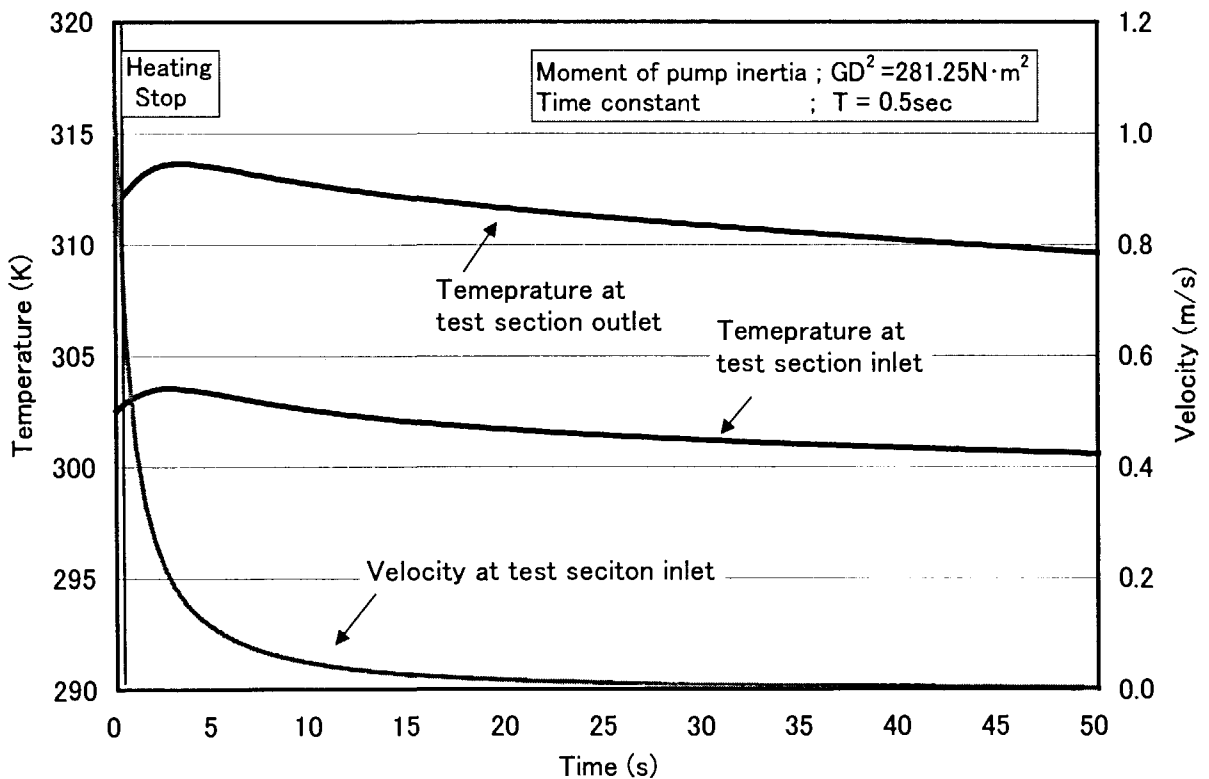


Fig.4.1(b) Temperature and velocity changes during loss of forced convection caused by pump trip (Moment of pump inertia : $281.25 \text{ N}\cdot\text{m}^2$)

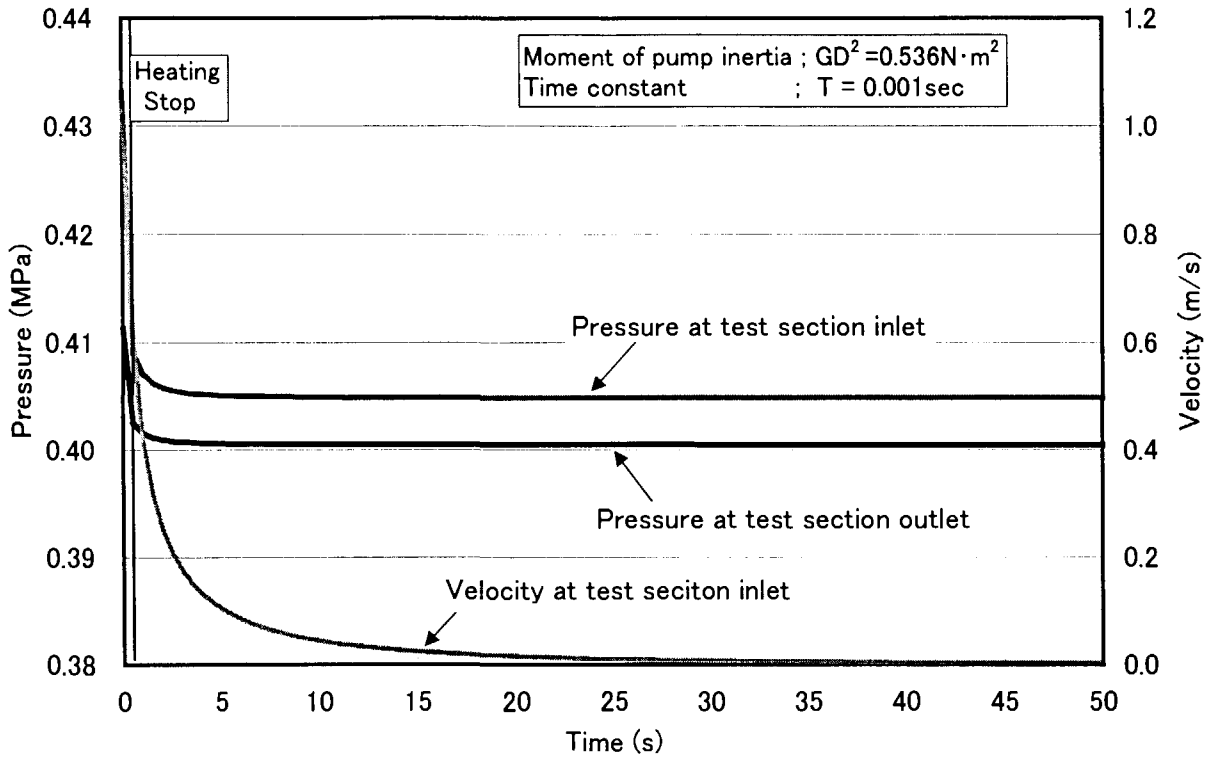


Fig.4.2(a) Pressure and velocity changes during loss of forced convection caused by pump trip (Moment of pump inertia : 0.536 N·m²)

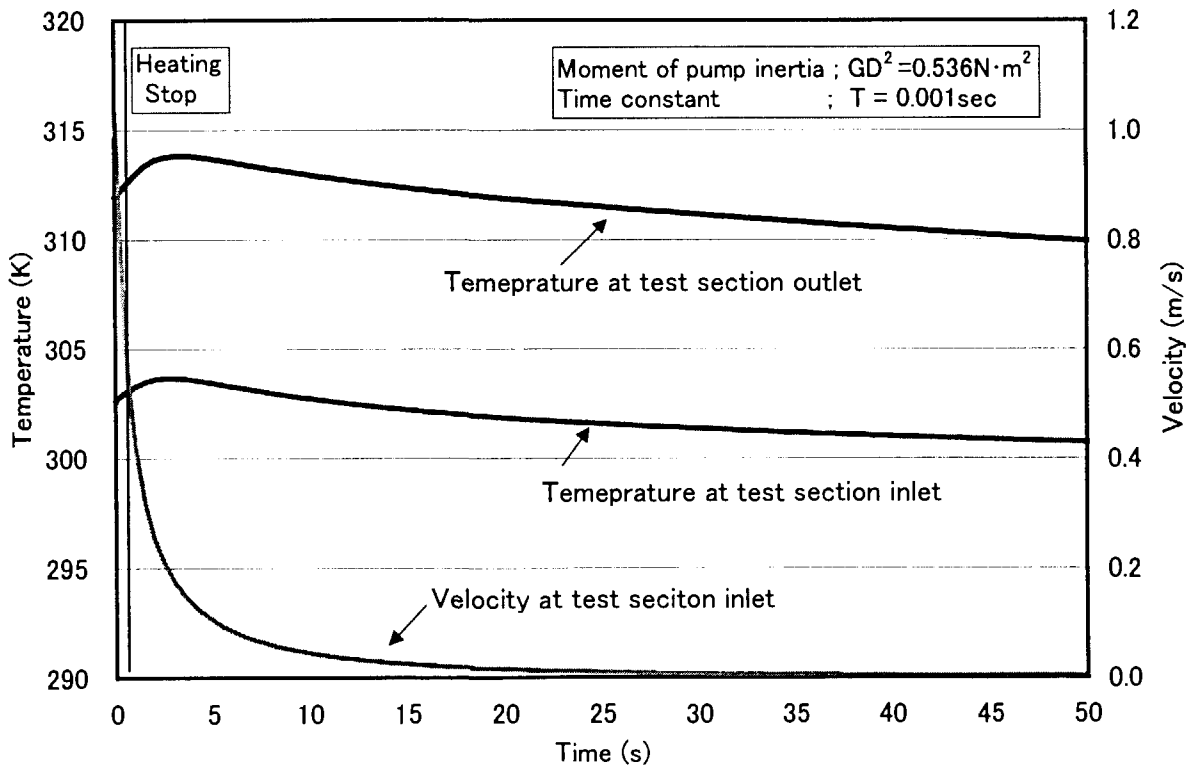


Fig.4.2(b) Temperature and velocity changes during loss of forced convection caused by pump trip (Moment of pump inertia : 0.536 N·m²)

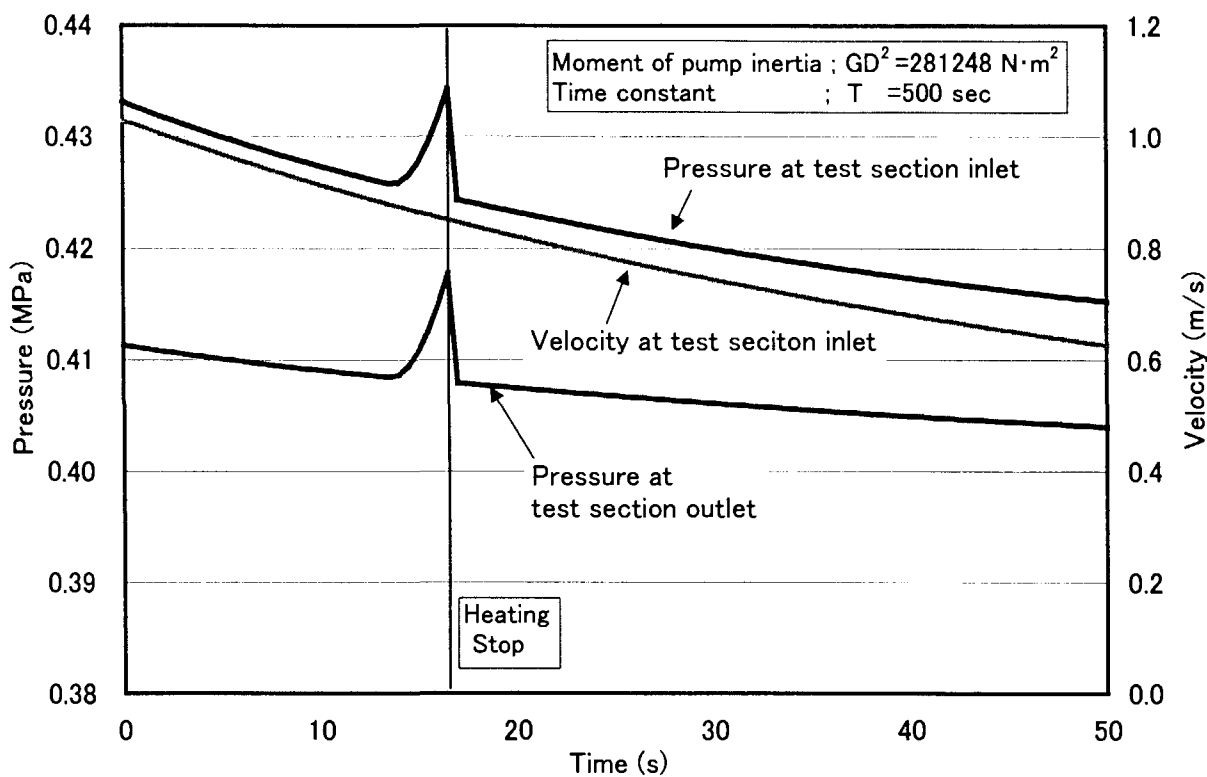


Fig.4.3(a) Pressure and velocity changes during loss of forced convection caused by pump trip (Moment of pump inertia : 281248 N·m²)

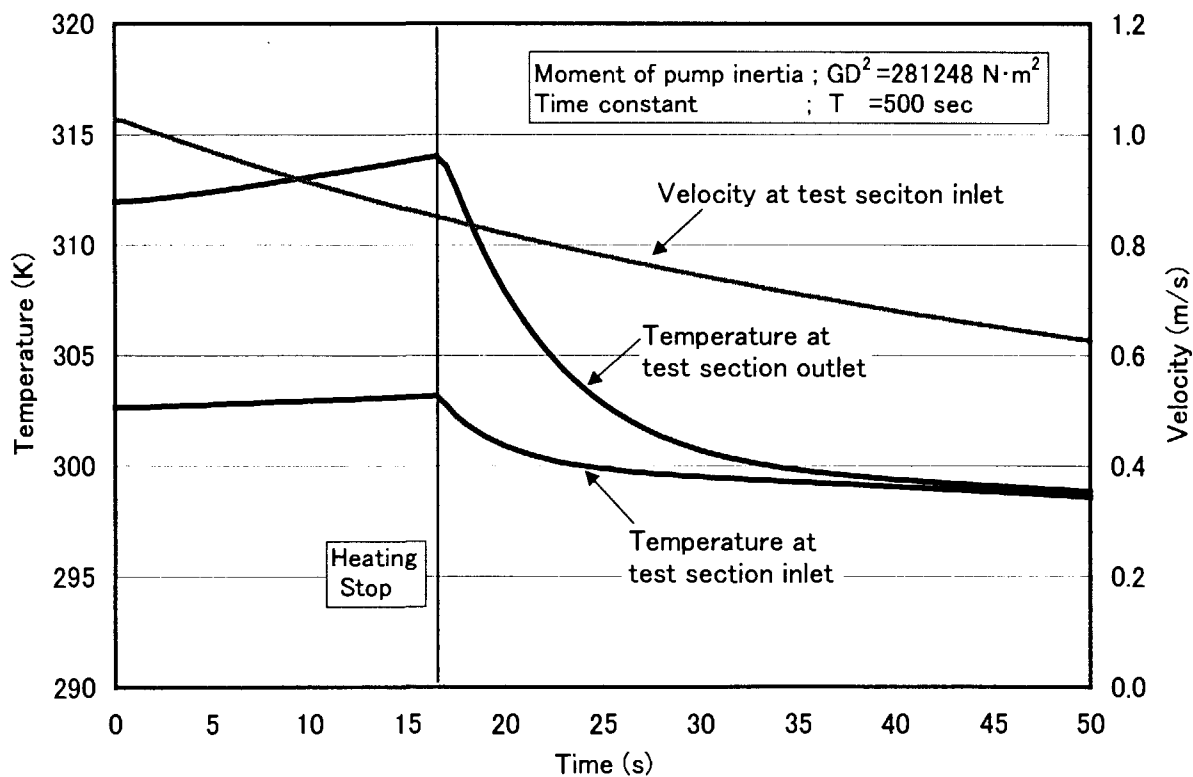


Fig.4.3(b) Temperature and velocity changes during loss of forced convection caused by pump trip (Moment of pump inertia : 281248 N·m²)

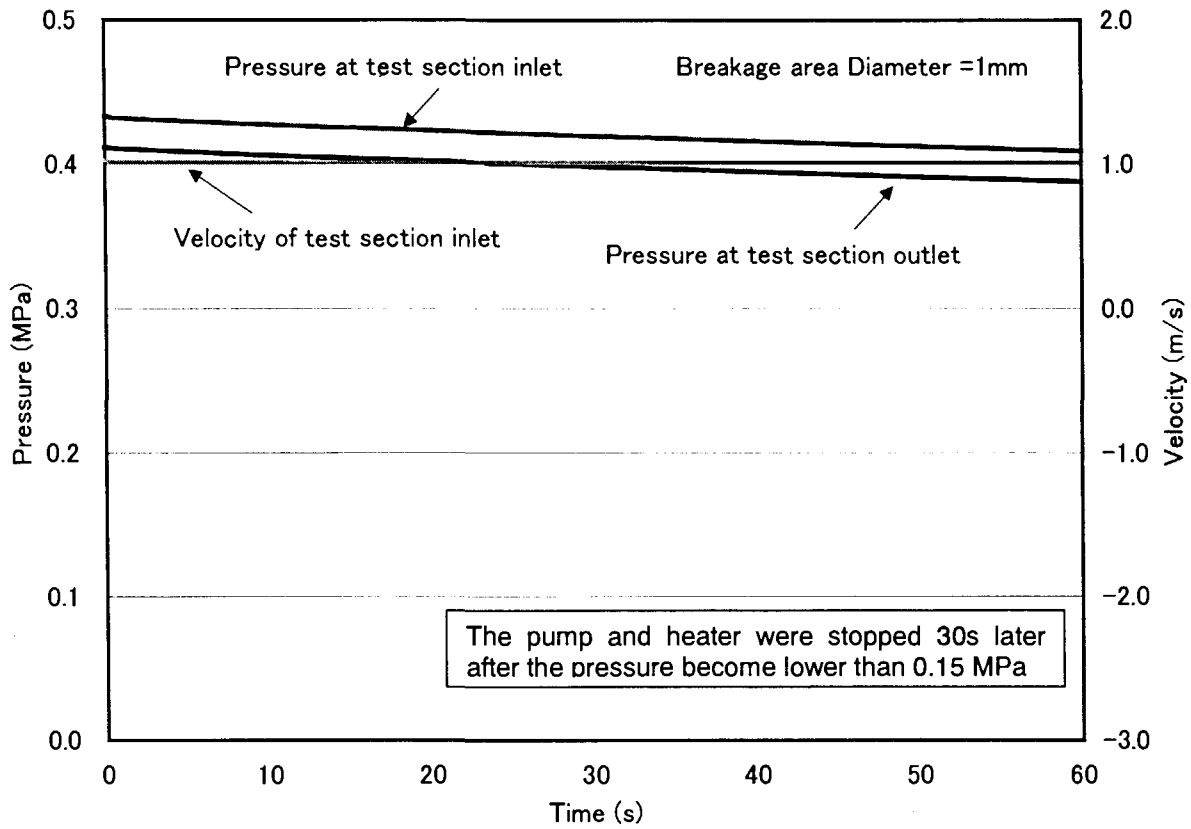


Fig.4.4(a) Pressure and velocity changes during loss of coolant accident (LOCA)
(Diameter of valve open area: 1.0mm)

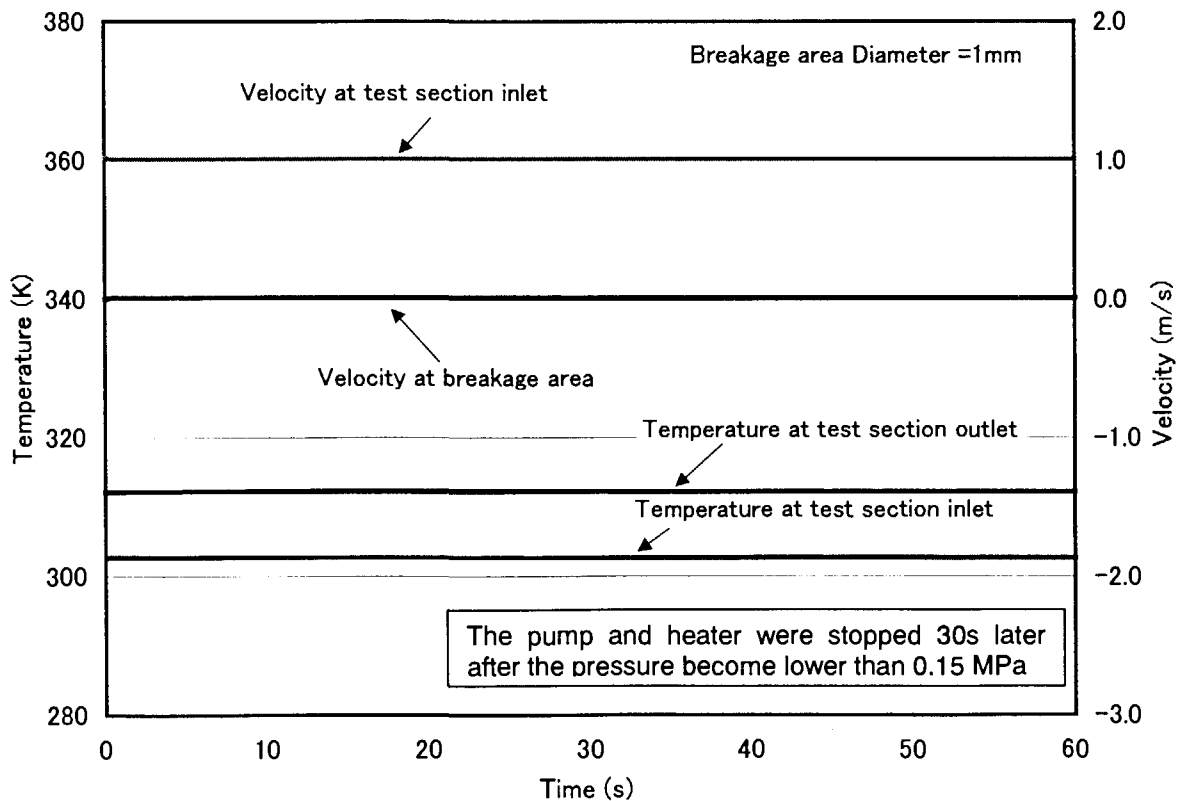


Fig.4.4(b) Temperature and velocity changes during loss of coolant accident (LOCA)
(Diameter of valve open area : 1.0mm)

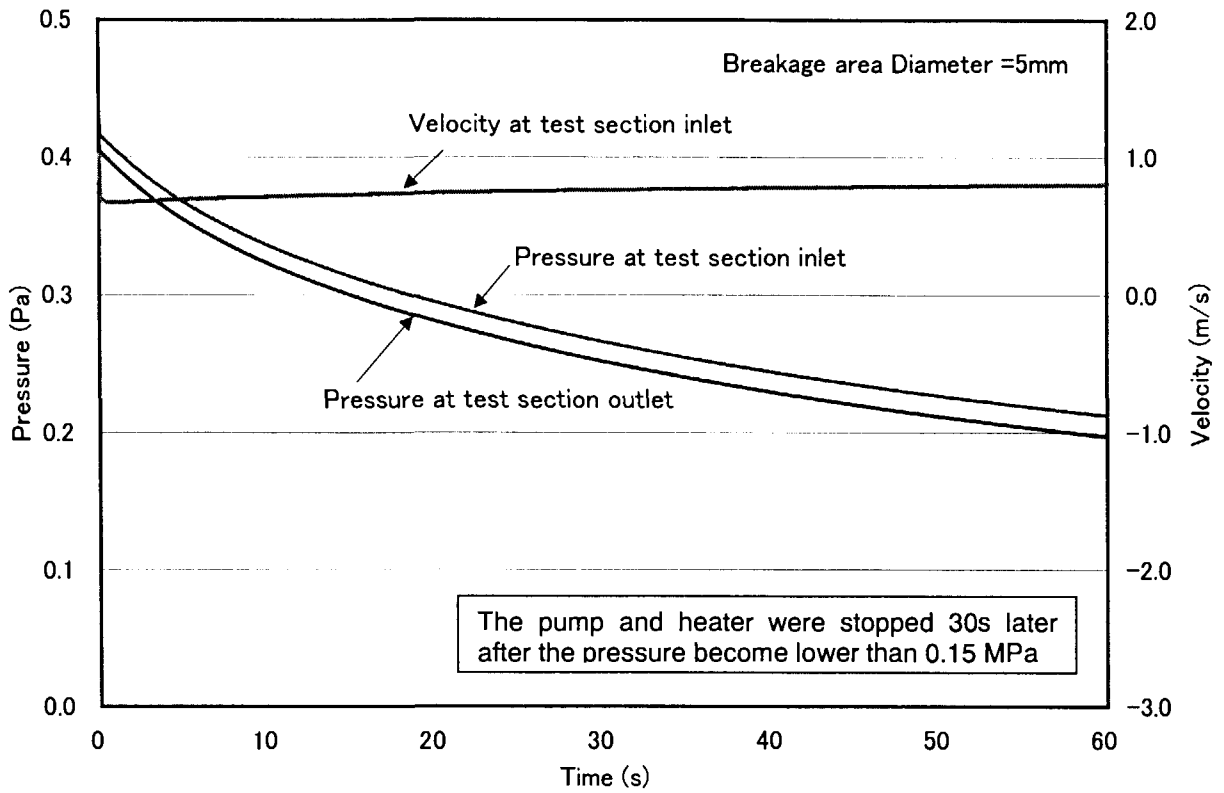


Fig.4.5(a) Pressure and velocity changes during loss of coolant accident (LOCA)
(Diameter of valve open area : 5.0mm)

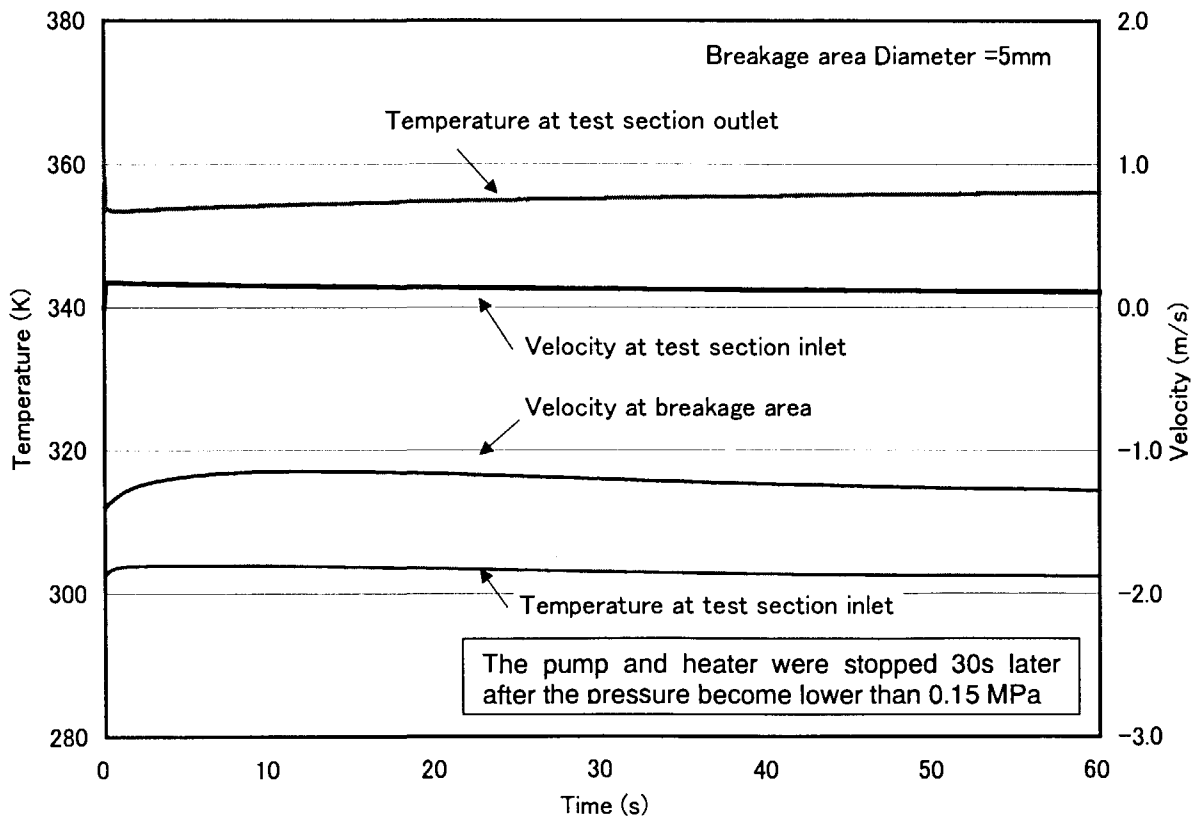


Fig.4.5(b) Temperature and velocity changes during loss of coolant accident (LOCA)
(Diameter of valve open area : 5.0mm)

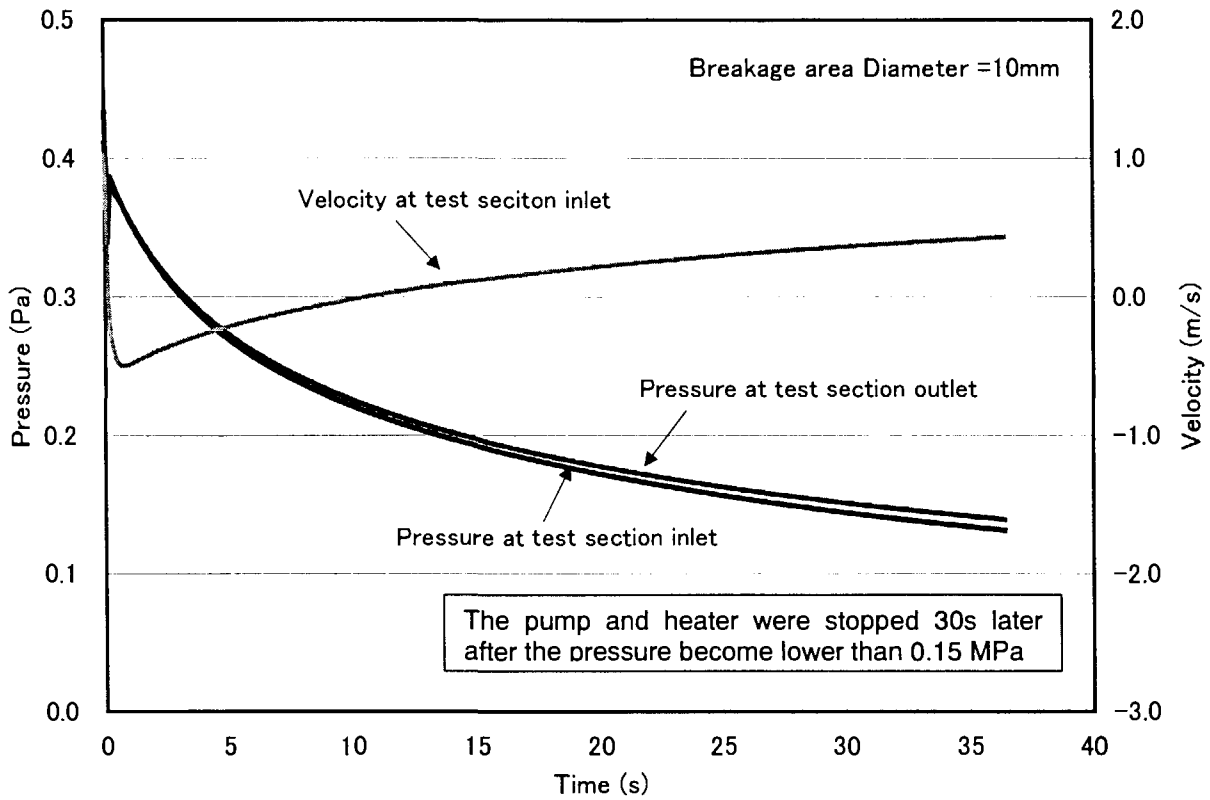


Fig.4.6(a) Pressure and velocity changes during loss of coolant accident (LOCA)
(Diameter of valve open area : 10.0mm)

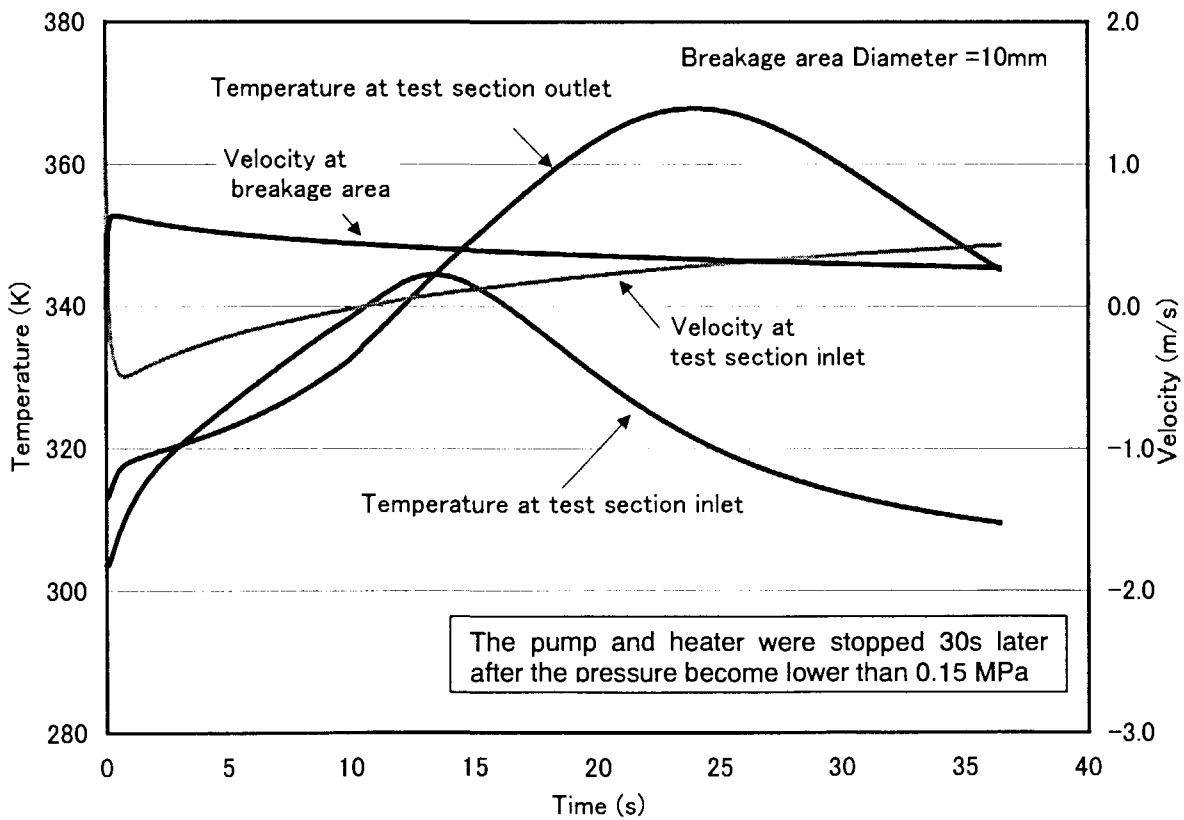


Fig.4.6(b) Temperature and velocity changes during loss of coolant accident (LOCA)
(Diameter of valve open area : 10.0mm)

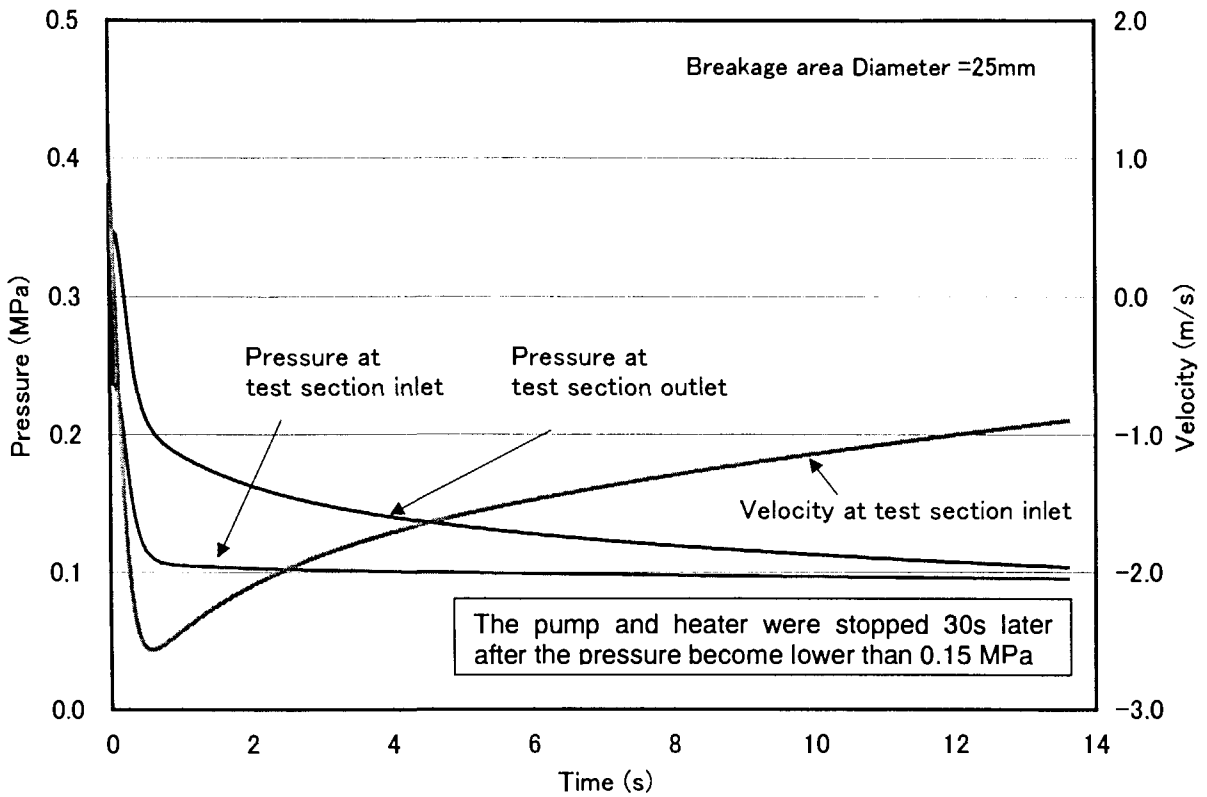


Fig.4.7(a) Pressure and velocity changes during loss of coolant accident (LOCA)
(Diameter of valve open area : 25.0mm)

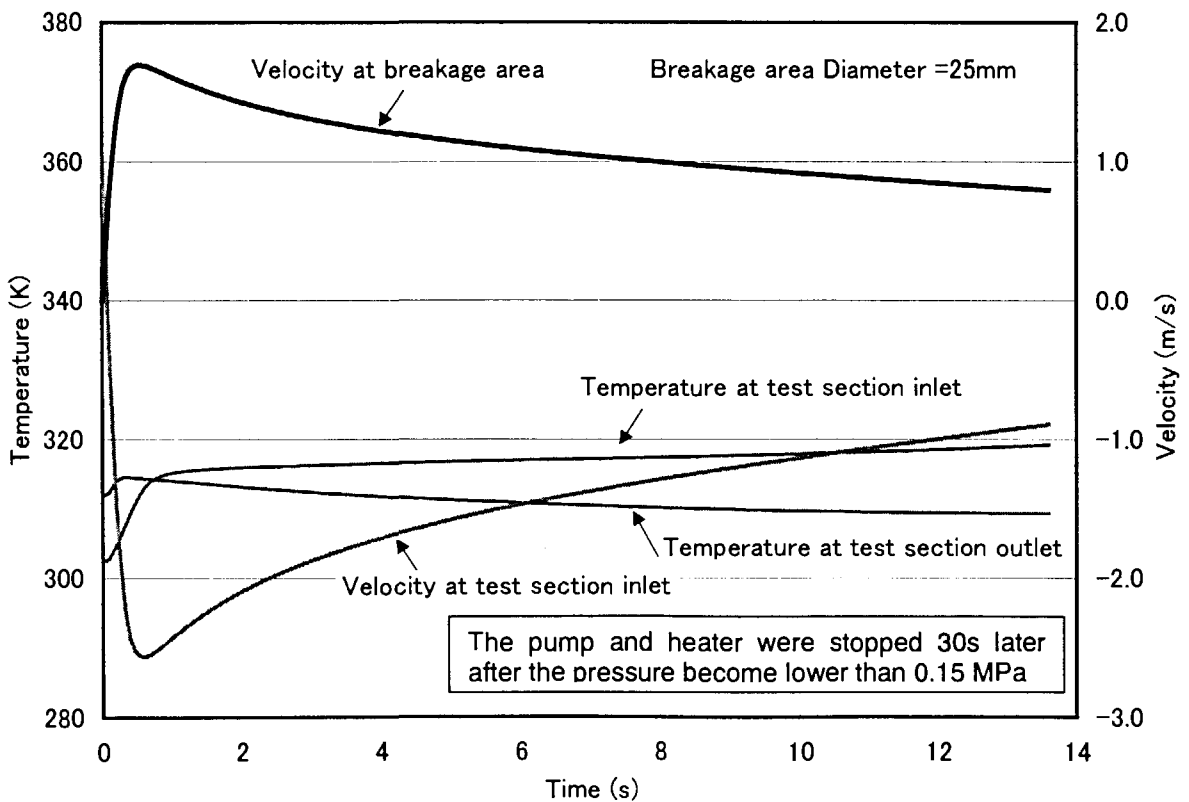


Fig.4.7(b) Temperature and velocity changes during loss of coolant accident (LOCA)
(Diameter of valve open area: 25.0mm)

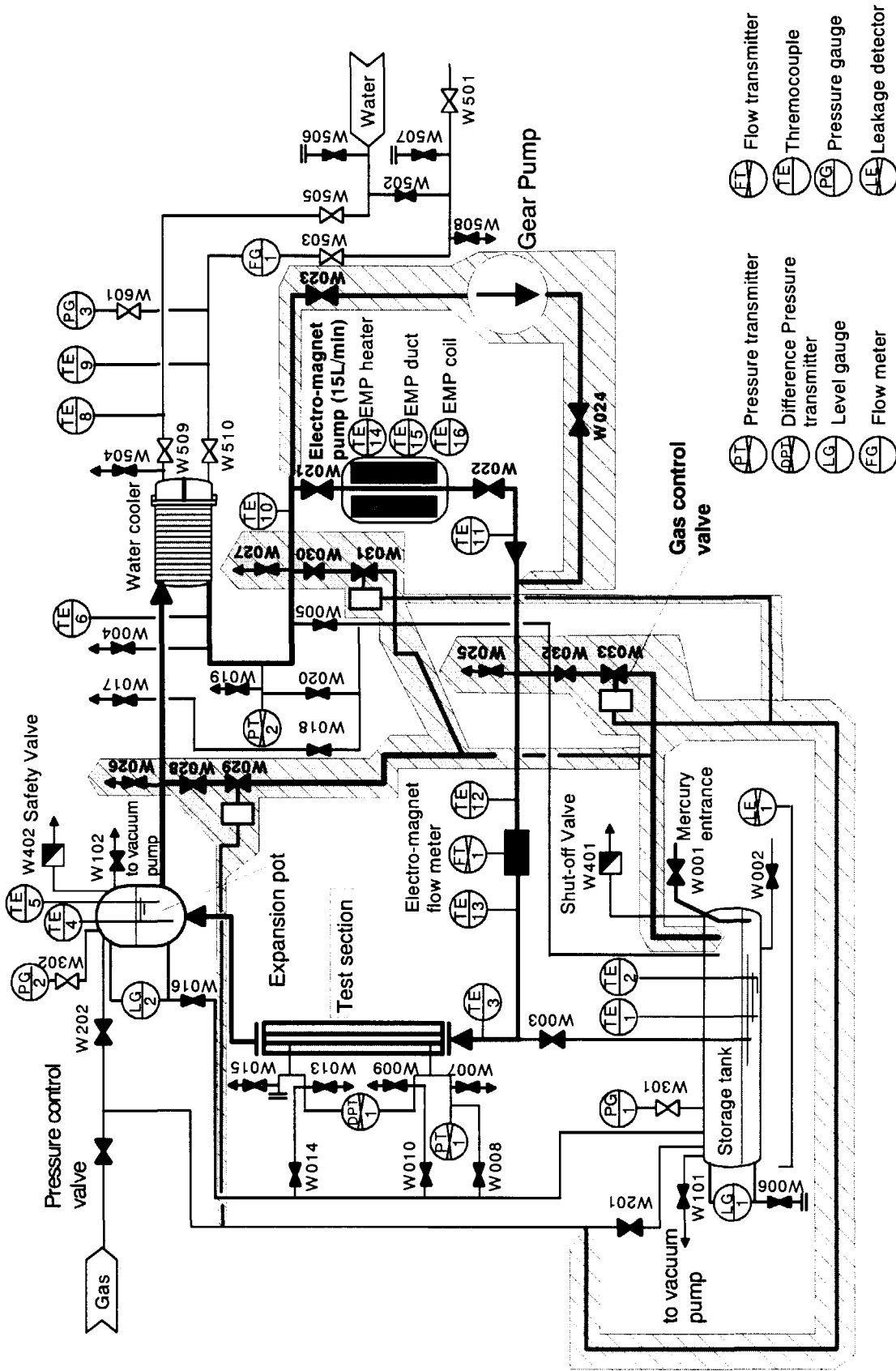


Fig. 5.1 Schematic flow diagram of remodeled mercury experimental loop for piping rupture test

This is a blank page.

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

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

表3 固有の名称をもつSI組立単位

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

表2 SIと併用される単位

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

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
 1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

| 名称 | 記号 |
|----------|-----|
| オンGSTローム | Å |
| バーン | b |
| バル | bar |
| ガリ | Gal |
| キュリ | Ci |
| レントゲン | R |
| ラド | rad |
| レム | rem |

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
 1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²
 1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
 1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
 1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
 1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
 1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
 1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

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

(注)

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

換算表

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

粘度 1 Pa·s (N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

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

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

| 放射能 | Bq | Ci |
|-----|------------------------|-----------------------------|
| | 1 | 2.70270 × 10 ⁻¹¹ |
| | 3.7 × 10 ¹⁰ | 1 |

| 吸収線量 | Gy | rad |
|------|------|-----|
| | 1 | 100 |
| | 0.01 | 1 |

| 照射線量 | C/kg | R |
|------|-------------------------|------|
| | 1 | 3876 |
| | 2.58 × 10 ⁻⁴ | 1 |

| 線量当量 | Sv | rem |
|------|------|-----|
| | 1 | 100 |
| | 0.01 | 1 |

RELAP5コードによる水銀流動基礎実験装置の過渡解析(第3報) 水銀物性値を用いた過渡解析