

JAERI-Tech
2002-002



JP0250083



水銀流動基礎実験(第3報)
異常時模擬試験計画

2002年2月

神永 雅紀・木下 秀考・羽賀 勝洋・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。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 沢城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 沢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, 2002

編集兼発行 日本原子力研究所

水銀流動基礎実験（第3報）

異常時模擬試験計画

日本原子力研究所東海研究所中性子科学研究センター

神永 雅紀・木下 秀孝・羽賀 勝洋・日野竜太郎

（2002年 1月 4日 受理）

日本原子力研究所（原研）と高エネルギー加速器研究機構（KEK）は、生命・物質科学に関する研究を促進するため、中性子散乱施設とミュオン科学実験施設から成る物質・生命科学実験施設の建設計画を進めている。中性子散乱施設では、大強度陽子加速器から1MWのパルス状陽子ビームを水銀ターゲットに入射させ、核破碎反応により発生した大強度の中性子を利用する。核破碎水銀ターゲットシステム設計では、安全性を確保しつつ中性子性能の向上を図っている。安全性に関しては、水銀ターゲットシステムが水銀を使用し、かつ、多量の核破碎生成物を内包することからシステムの異常時の過渡挙動を把握し、異常を早期に検出して安全に収束させるための検出手法や安全保護系の概念構築が急務となっていました。これまで軽水炉の安全解析で実績のあるRELAP5を用いた解析評価を進めてきた。本報告書は、解析結果の検証を目的として策定した水銀流動基礎実験装置による異常時模擬試験計画について述べたものである。試験の実施に当たっては、水銀流出流量を精度良く計測できるよう実機で採用可能な技術の先行試験も兼ねてレーザー方式レベル計を膨張ポットに設置するとともに、膨張ポット内の水銀液位変動を抑制するためにバッフル板を膨張ポット内に設置した。水銀流量11L/min時における流動時の膨張ポットの液位を測定したところ変動幅は±0.5mm以内であり、流出量測定に十分な性能を示した。

Mercury Flow Experiments
(3rd Report ; Simulation Test Plan under Abnormal Condition)

Masanori KAMINAGA, Hidetaka KINOSHITA, Katsuhiro HAGA and Ryutaro HINO

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

(Received January 4, 2002)

Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) and High Energy Accelerator Research Organization (KEK) are promoting construction plan of Material-Life Science Facility, which is consisted of Muon Science Facility and Neutron Scattering Facility, in order to open up the new science fields. The Neutron Scattering Facility will be utilized for advanced fields of Material and Life science using high intensity neutrons generated by the spallation reaction induced by injecting a 1MW pulsed proton beam onto a mercury target. Design of the spallation mercury target system is in progress to obtain good neutron performance keeping high reliability and safety. The target material is mercury. As a result of the spallation reaction, large amount of radioactive spallation products are to be contained in the mercury. Therefore to establish the safety of the target system, transient behaviors of the system during anticipated events should be well understood. The safety protection system and an instrumentation system for detecting abnormal conditions must be designed based on the transient behaviors in order to terminate the transient events safely. Transient behaviors of the mercury system were analyzed by using RELAP5, which has been used for safety analysis of light water reactors. This report presents a test plan of mercury system transient phenomena during abnormal events using a mercury experimental loop. To perform the tests, a laser level sensor was set on an expansion pot to measure an effluent mercury flow rate precisely and baffle plates were installed in the expansion pot to reduce a movement of mercury surface in the expansion pot. After this modification, fluctuation of a mercury surface was measured at flow rate flowing of 11L/min. As a results, $\pm 0.5\text{mm}$ was observed. This performance is sufficient to measure the amount of effluent mercury from the experimental loop.

Keywords ; Mercury Flow System, Safety Analysis, Mercury Experimental Loop, RELAP5,
Simulated Test

目 次

1. 緒 言	1
2. 水銀流動基礎実験装置の改造	2
2.1 改造概要	2
2.2 追加及び設計変更機器仕様	2
3. 異常時模擬試験計画	15
3.1 試験目的	15
3.2 配管破断による冷却材喪失(LOCA)時のシステム応答試験	16
3.3 ポンプトリップによる強制流動喪失(LOFA)時のシステム応答試験	17
4. 結 言	21
謝 辞	21
参考文献	22

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of Modification for Mercury Experimental Loop	2
2.1 Modification Point of Mercury Experimental Loop	2
2.2 Additional and Changing Components	2
3. Test Plan of Abnormal Events Simulated Experiments	15
3.1 Purpose of Abnormal Events Simulated Experiments	15
3.2 System Response Tests at the Loss of Coolant Accident (LOCA) by Pipe Rupture	16
3.3 System Response Tests at the Loss of Forced Convection Accident (LOFA) by Pump Trip ..	17
4. Concluding Remarks	21
Acknowledgement	21
Reference	22

1. 緒 言

日本原子力研究所（原研）と高エネルギー加速器研究機構（KEK）は、増大する中性子ビームの需要に応えるとともに生命・物質科学に関する新しい研究領域の開拓を開拓するため、中性子散乱施設を中核とした生命・物質科学研究施設の建設設計画を進めている。中性子散乱施設は、大強度陽子加速器から1MWのパルス状陽子ビームを水銀ターゲットに入射させ、核破碎反応により発生した大強度の中性子を生命・物質科学等の先端分野の研究に供する計画である。

核破碎水銀ターゲットシステムの設計では、安全性を確保しつつ中性子性能の向上を図ることを基本方針としている。ターゲットシステムは水銀や重水を使用し、かつ、核破碎反応による核破碎生成物や中性子照射により生成される放射性核種を内包する。従って、安全性の確保では、ことから放射線防護と財産保護の両面からの検討が重要である。

水銀ターゲットシステムの安全の考え方は、① 万一、配管破断等により核破碎生成物を含む水銀や、冷却材中のトリチウム等の放射性核種が放出されるような事態が生じても、施設内の研究者・運転員等の従事者や施設外の一般公衆に対する被曝を可能な限り低くするための放射線防護と、② 商用電源喪失や循環ポンプの機械的・電気的な故障等の、異常が生じても直ちに放射性核種の放出や照射線の漏洩等を伴わないが、放置しておくとターゲット容器や冷却系機器等の破損などに発展する恐れのある事象が生じた場合に、安全保護系等の働きにより機器の破損に至る前に事象の進展を安全に収束させ通常運転に復帰できるようにする財産保護の2つの概念により成っている。

上記いずれ場合にも、異常時のシステム過渡挙動を解析により把握し、異常を早期に検出して安全に収束させるための検出手法や安全保護系の概念構築が急務である。これまでRELAP5を用いたシステム特性解析評価を進めてきた^{(1), (2), (3)}。

また、解析と並行して、水銀流動システムの流動特性の把握と水銀流動用ポンプ等、機器の開発のため、水銀流動基礎試験装置を作成して水銀流動基礎実験を実施してきた^{(4), (5)}。

本報告書は、これらの解析評価結果に基づき、解析結果の検証を目的として計画した水銀流動基礎実験装置による異常時模擬試験に関し、試験用に改造した装置の概要及び試験計画についてまとめたものであり、第2章に水銀流動基礎実験装置の改造点を、第3章に試験計画を示した。

2. 水銀流動基礎実験装置の改造

2.1 改造概要

異常時模擬試験に用いる水銀流動基礎実験装置（以下、水銀ループと称す）の外観写真を Photo 2.1 に示す。また、機器構成については構成表を Table 2.1 に示す。Table 2.1 に示した機器のうち、膨張ポットを新規に変更し、レーザー方式液位計及びピストン弁を異常時模擬試験（配管破損模擬試験）用に追加した。特に今回の異常時模擬試験用に改造した部分については下線で示す。

Fig.2.2 には、加熱試験流路の設計図を、また、Photo 2.3 には加熱試験流路の外観を示す。加熱試験流路はステンレス製の配管を加熱用の銅ブロックで挟み込むようにし、銅ブロックの外周にはマイクロヒーター(4.8kW)を密に巻き付けてある。

Fig.2.3 に膨張ポットの設計図を、Photo 2.4 には組立時の外観を示す。膨張ポットは、配管破損模擬試験時に液位の低下速度から流出流量が評価できるようにレーザー方式液位計を設けるとともに、流出流量をより長時間測定できるようにするために容量を 4 リットルから 12 リットルへ増加させた。また、膨張ポットの変更に当たっては、膨張ポット内でのガス気泡巻き込みによる電磁流量計指示値の振動を防止するために流入位置の変更、レーザー方式液位計により安定して液位が測定できるよう、液面の振動を防止するよう内部に大規模の渦流動等を防止するバッフル板を 2 枚設置した。

ピストン弁は配管破損を模擬するために設けたもので、瞬時開が可能であり、流出する水銀をドレンタンクまで導く配管を増設（3 ライン：ポンプ出口、ポンプ入口、冷却器入口）した。流出流量は、ピストン弁手前に設けたボール弁、または、ボール弁をオリフィス等に置き換えることにより破損口径を調整して行う。Photo 2.2 にピストン弁及びボール弁の外観を示す。

Fig.2.1 に変更後の水銀ループのフローシートを示す。

2.2 追加及び設計変更機器仕様

(1) 加熱試験流路

型式：マイクロヒータ加熱試験流路
 流体：水銀
 材質：流路部 SUS316
 加熱部 銅
 尺寸：流路部 外径 $\phi 21 \times t3.7$ （内径 14.3 mm）、全長 1000 mm
 （レジューサ及びフランジ部含む）
 加熱部 外径 $\phi 45 \times$ 内径 $\phi 21$ 、全長 600 mm
 接続配管：25A (JIS10K フランジ接続)
 設計圧力：0.9 MPa
 設計温度：373 K (流路側表面温度)

数　　量： 1 体
 加　熱　部： マイクロヒータ (DC160 V/4.8 kW, SUS316 シース ϕ 3mm)
 付　属　品： 熱電対 (K-type, NCF600 シース、シース径 ϕ 0.5、32 本)
 　　　　　　熱電対 (K-type, NCF600 シース、シース径 ϕ 1.0、2 本)
 　　　　　　熱電対 (K-type, SUS316 シース、シース径 ϕ 3.2、2 本)
 　　　　　　導圧ノズル (導圧口径 1.5mm)
 　　　　　　保温材
 備　　考： (a) Fig.2.2 に構造概要を示す。
 　　　　　　(b) Photo 2.3 に組立中の加熱試験流路を示す。
 　　　　　　(c) 加熱電源は既存の直流電源装置を用いる。

(2) レーザー方式液位計

型　　式： 赤色半導体レーザー方式変位計
 　　　　　　センサヘッド : LK-500 (キーエンス製)
 　　　　　　アンプユニット : LK-2500 (キーエンス製)
 波　　長： 690 nm
 レーザー出力： 15 mW (クラス 3B レーザ)
 測定範囲： \pm 250 mm (ロングモード)
 分　解　能： 50 μ m (ロングモード)
 出　　力： \pm 5 V (\pm 250 mm に対応 (50 μ m/mV)、ロングモード時)
 数　　量： 1 式

(3) 膨張ポット

型　　式：バッフルプレート付縦置き円筒型容器
 容　　量：約 12 リットル (気相部約 3 リットル、水銀部約 9 リットル)
 設計圧力：0.89 MPa
 設計温度：423 K
 概略寸法：150A×700 mm (高さ)
 主要材質：SUS316
 数　　量：1 基
 付　属　品：(a) 水銀入口／出口ノズル (25A) 各 1 個
 　　　　　　(b) パージガス用ノズル (1/4 インチ) 1 個
 　　　　　　(c) 真空引き用ノズル (1 B) 1 個
 　　　　　　(d) 導圧ノズル (3/8 インチ) 1 個
 　　　　　　(e) 浮き子式液位計 (上下限警報接点付き) 1 個
 　　　　　　(f) ブルドン管 (SUS 製、計測範囲～0.6 MPa) 1 個
 　　　　　　(g) 水銀温度計測用熱電対 (SUS316 シース、 ϕ 3.2 mm) 2 本

(h) 安全弁(0.54 MPa で動作)	1 個
(i) 視き窓 (パイレックスガラス製)	2 箇所
(j) レーザー入射窓 (パイレックスガラス製)	1 個所
(k) バッフルプレート	2 枚
(l) ベローシールグローブ弁 (液位計閉止用)	1 個

備考： (a) Fig.2.3 に構造概要を示す。
 (b) Photo 2.4 に組立中の加熱試験流路を示す。

(4) ピストン弁

型式：電磁弁付きガス作動型ピストン弁（常時閉タイプ）
 口径：1/2 inch
 設計圧力：2 MPa、最大使用圧力 1.5 MPa
 設計温度：423 K
 材質：SUS316（本体）
 応答時間：0.16 sec（全閉→全開）
 内部シール：テフロン
 電磁弁部：作動圧力差：0.15~1.0 MPa
 最大使用圧力：2 MPa
 流体：空気、不活性ガス、水
 応答時間：5~10 ms
 数量：3 個（配管破損模擬ライン）

(5) 手動弁

型式：ボール弁(Whitee)
 口径：10A
 設計圧力：1.08 MPa
 設計温度：423 K
 材質：SUS316
 数量：3 個（配管破損模擬ライン）

(6) 増設配管

口径：10A-Sch80（配管破損模擬ライン）
 主要材質：SUS316
 数量：3 式

(7) 直流電源装置

型式：定電圧／定電流直流安定化電源装置

GP0160-100R (高砂製作所製)

出力電圧範囲 : 0~160V

出力電流範囲 : 0~100A

電圧設定精度 : $\pm 0.005\% + 3mV$ 以下

電流設定精度 : $\pm 0.05\% + 10mA$ 以下

入力電源 : 三相 400V、 28KVA

電流モニター出力 : DC0~10V (0~100A (電流) に対応)

数量 : 1台

重量 : 約 400 kg

今回の改造によって設置したレーザー方式液位計付き膨張ポットにおける液位の変化を Fig.2.4 に示す。液位を計測した時の流量は約 11L/min で、過渡解析時の定常状態の時の流量とほぼ同じである。図に見られるように、液位は細かな揺れはあるものの安定しており、最大で 11.2mm、最小で 10.8mm と変化の幅は 0.4mm で、標準偏差は 0.07mm である。膨張ポットの内径は 151mm で断面積は $1.7908 \times 10^{-2} m^2$ であり、液位の変化幅による体積変動は 7.16cc であり、この値が不確かさを与える。このことから、今後実施する水銀流出時の過渡実験における水銀流出量は最低でも数百 cc であるので、流出量は十分な精度で測定できるものと考えられる。さらには、実機における水銀流出等の異常時にも、流出の検知と水銀流出量の測定が必要となるので、今回設置したようにサージタンクに液面の乱れを防止するようバッフル板を設け、レーザー方式の液位計を設置すれば、実機での異常時にも対応できると考えられる。

また、この流動条件下におけるループ内圧力分布を、RELAP5 で解析した結果を Fig.2.5 に示す。ポンプで昇圧され、テストセクション及び熱交換器で圧力損失により降圧して再びポンプ入口まで戻ってきている。パイプ部分で圧力が上昇している部分があるが、ここで示してある圧力は静圧であり、ループの高低差による圧力変化も加わっているためにこのような圧力上昇を生じている。図中には測定位置もあわせて示しており、RELAP5 による解析結果と非常によく一致していることから、RELAP5 によってループの圧力変動が妥当な範囲で評価できることが分かる。

Table 2.1 Component list of JAERI mercury experimental loop

No.	機器名称	数量	備考
1	ドレンタンク	1	
2	<u>加熱試験流路</u>	2	非加熱: 1、 <u>加熱: 1</u>
3	<u>膨張ポット</u>	1	<u>異常時模擬試験用に変更</u>
4	水銀純化装置	—	将来設置予定
5	冷却器	1	
6	電磁ポンプ	1	
7	予熱器	—	将来設置予定
8	電磁流量計	1	
9	ドレンパン	1	
10	チャコールフィルタ	1	
11	換気用ファン	1	
12	ギアポンプ	1	
13	回転計	1	ギアポンプ特性試験用
15	<u>レーザー方式液位計</u>	1	<u>膨張ポット液位の高精度測定用</u>
16	<u>直流電源装置</u>	1	試験流路加熱用
17	ピストン弁	3	配管破損模擬試験用

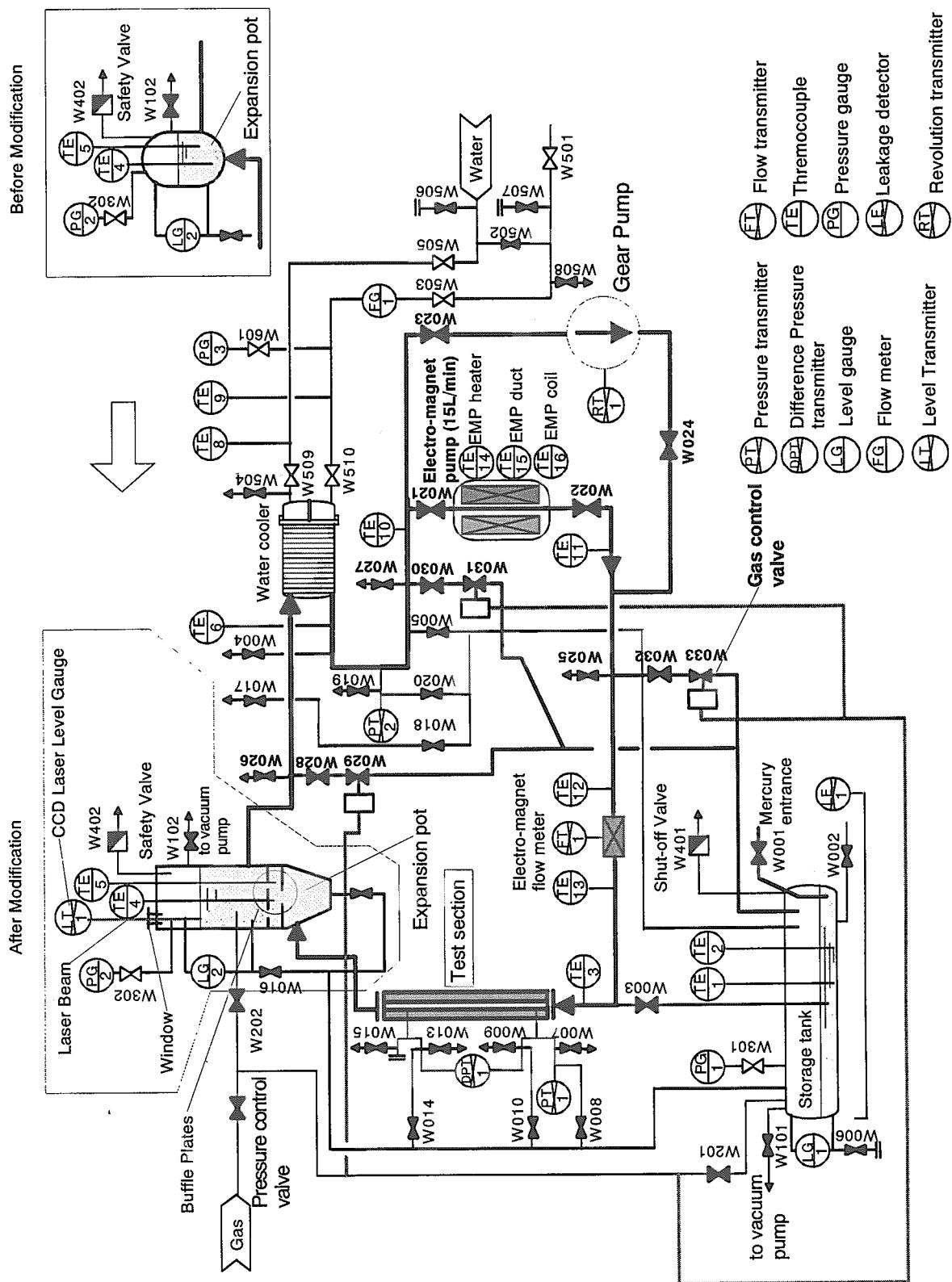


Fig. 2.1 Schematic diagram of the mercury experimental loop

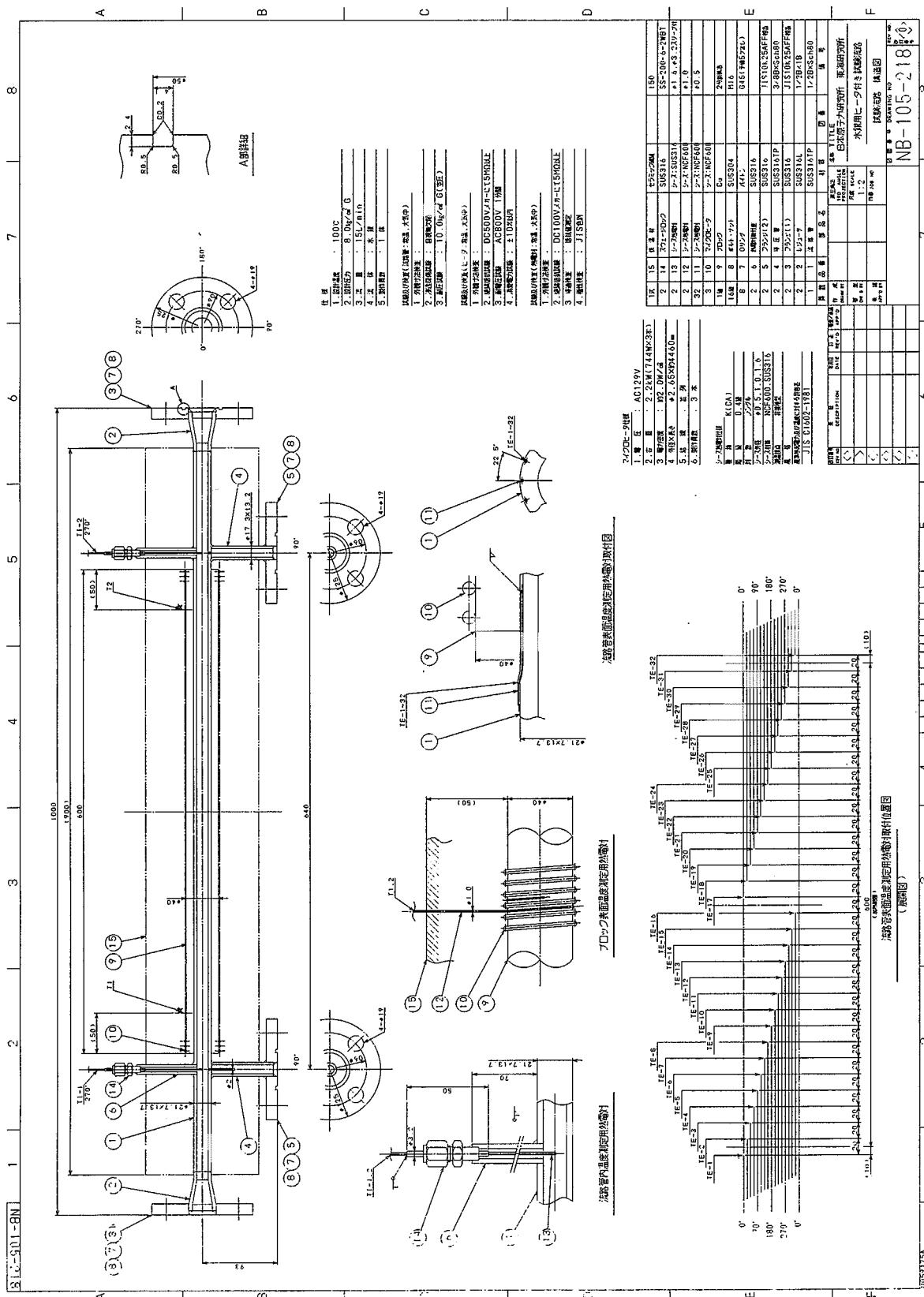


Fig.2.2 Schematic Drawing of Heating Test Section

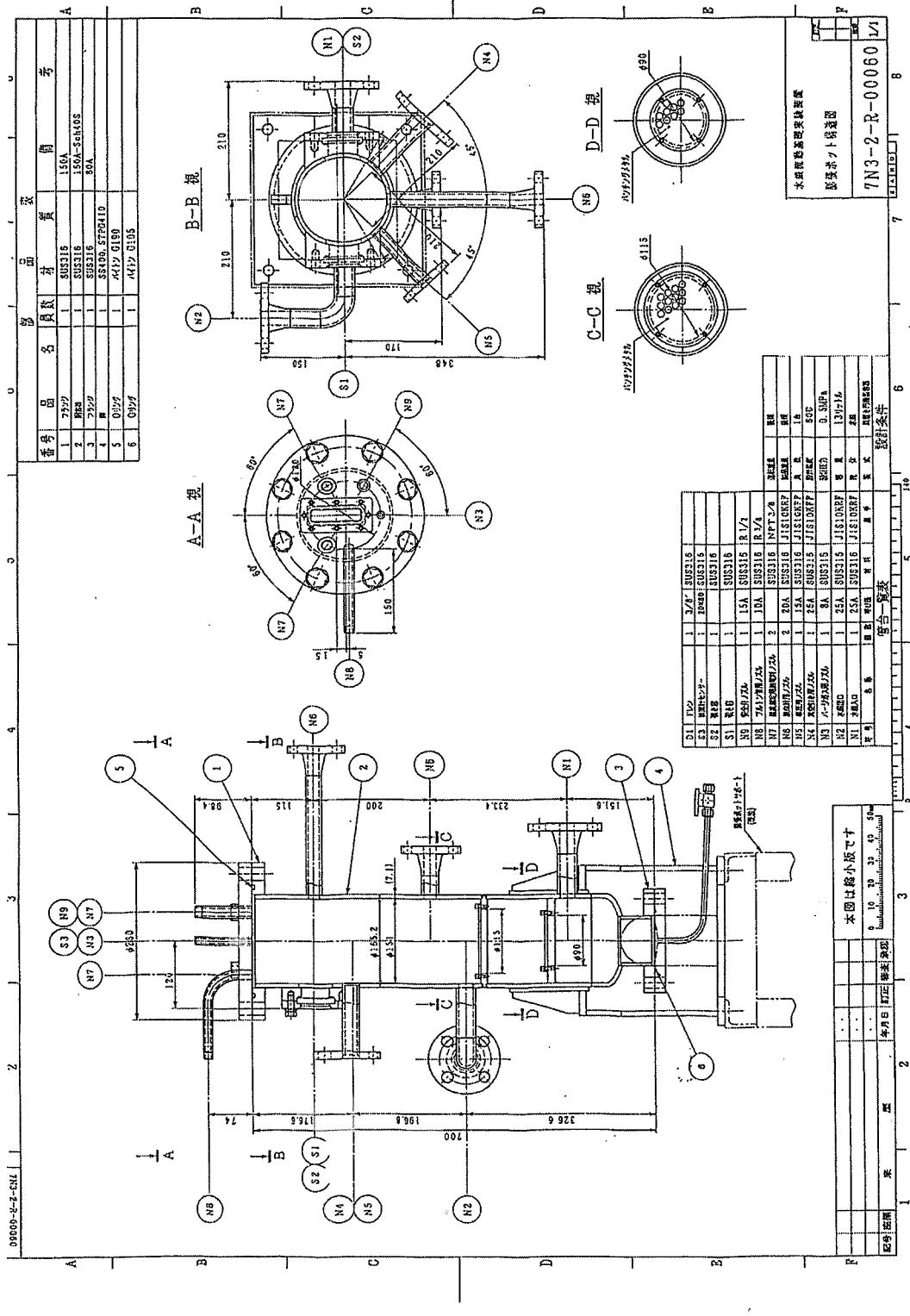


Fig.2.3 Schematic drawing of modified expansion pot

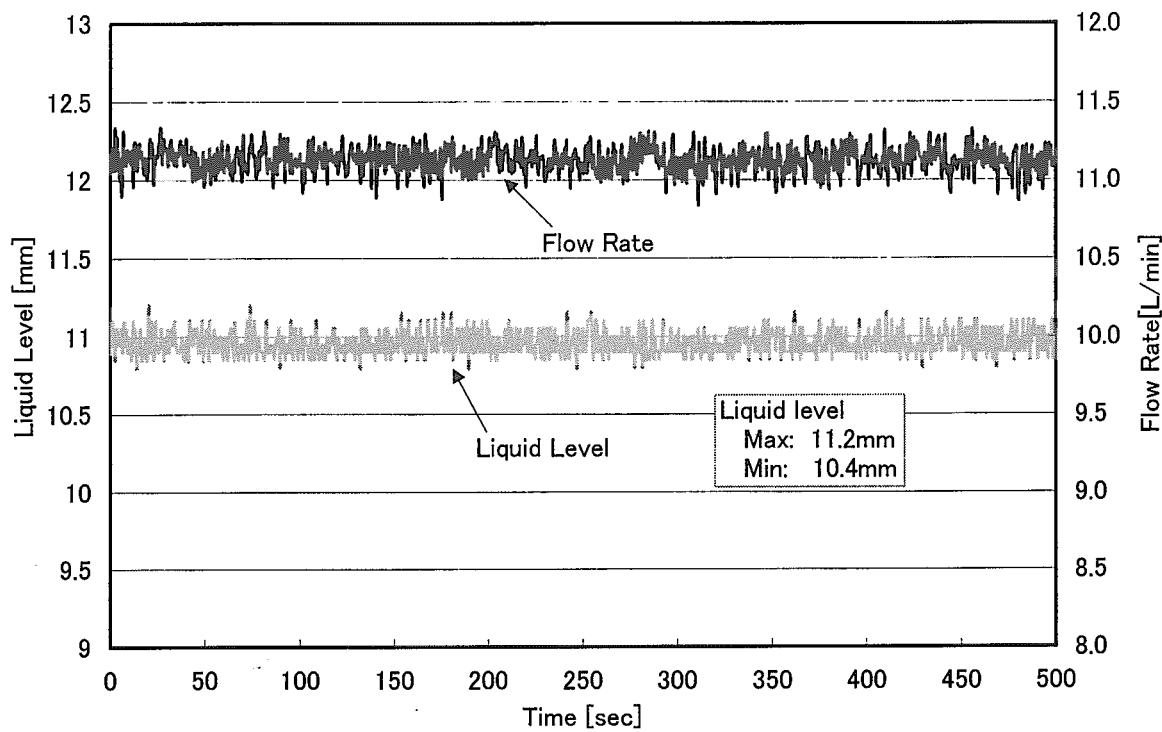


Fig.2.4 Liquid level in modified expansion pot

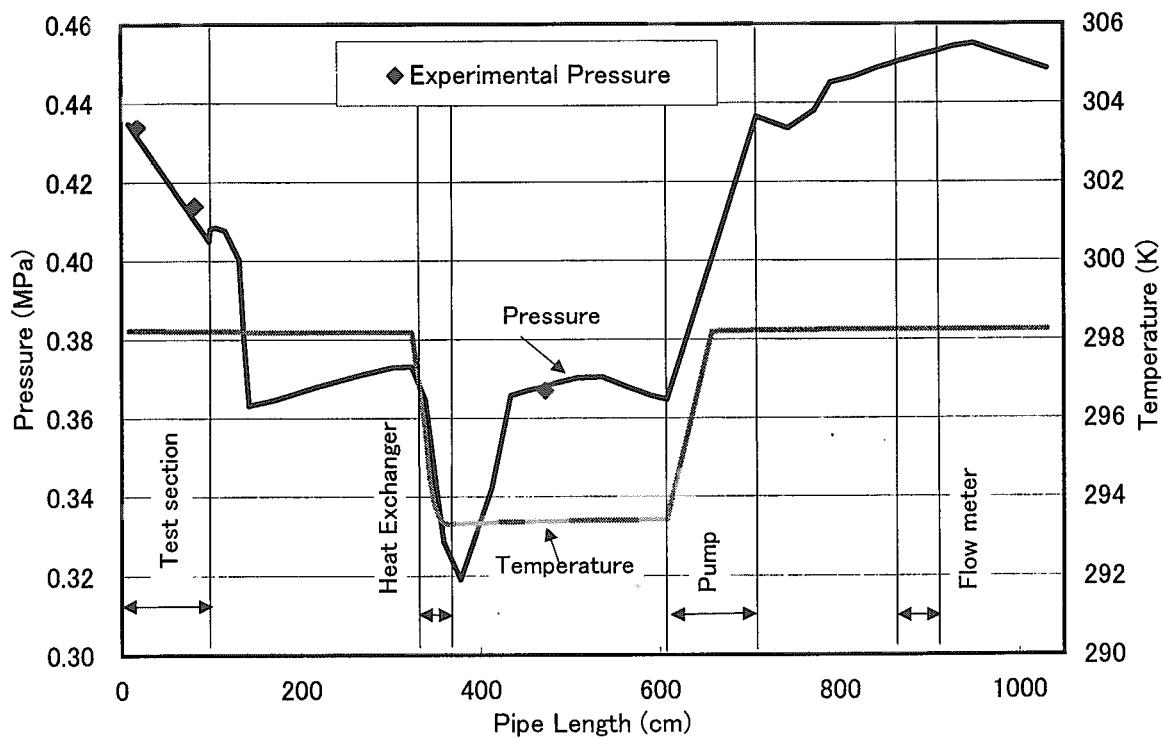
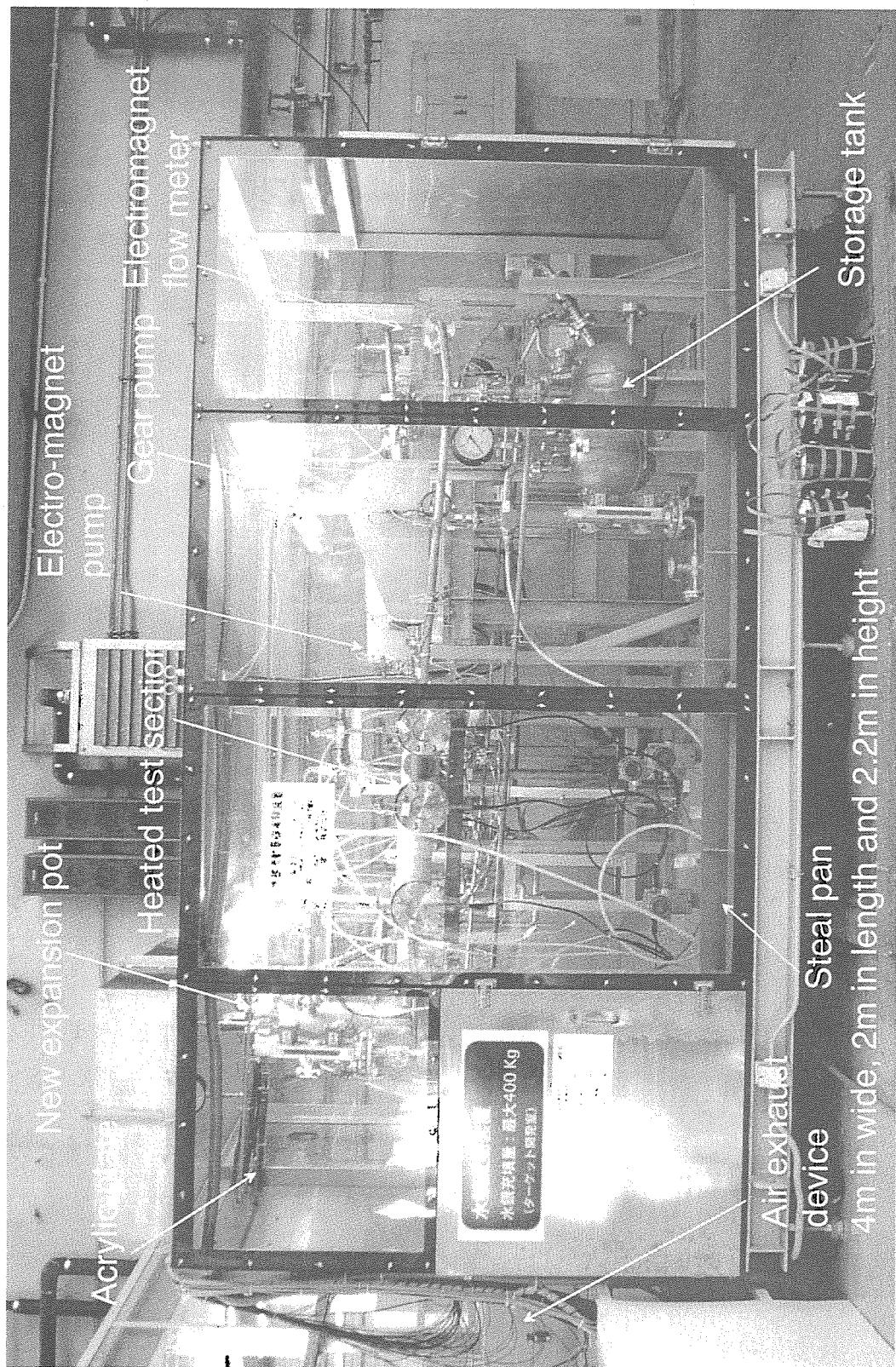


Fig.2.5 Temperature and pressure distributions in mercury experimental loop under steady-state situation after modification



Outer View of Mercury Loop

Flow rate of mercury : 15L/min , Inventory of mercury : 400kg (maximum)

Photo 2.1 External view of JAERI mercury experimental loop

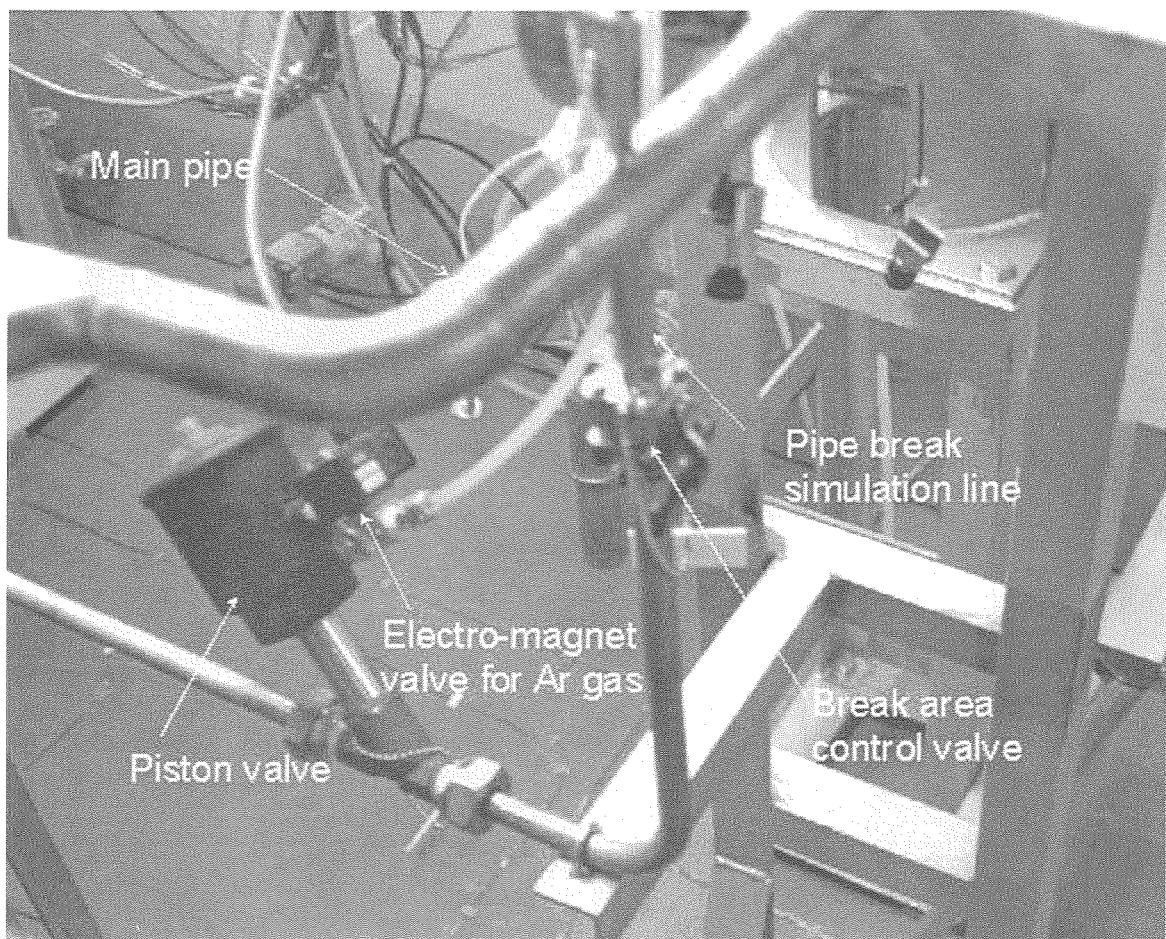


Photo 2.2 Additional Piping and valves for simulated pipe rupture experiments

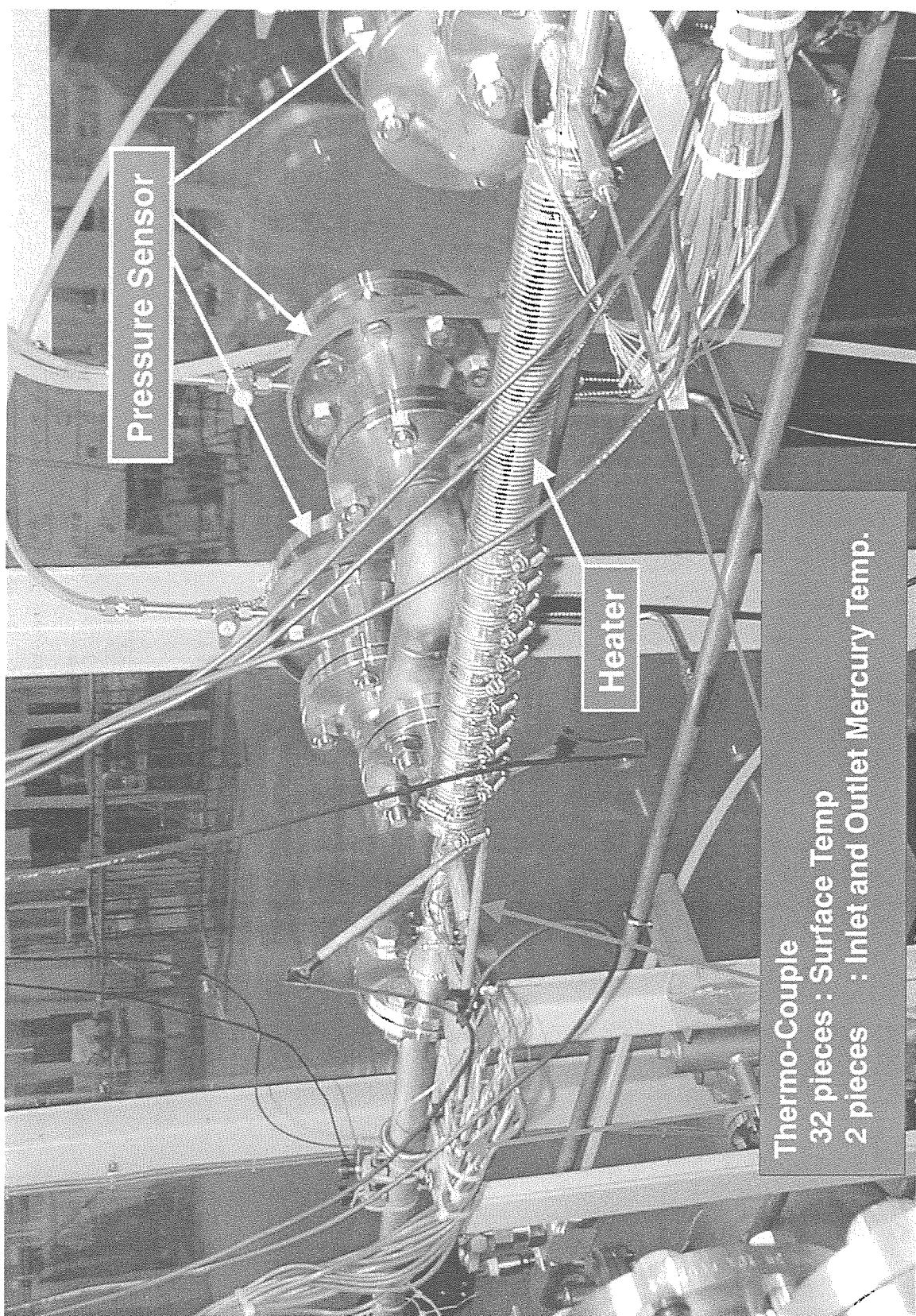


Photo 2.3 Heating Test Section

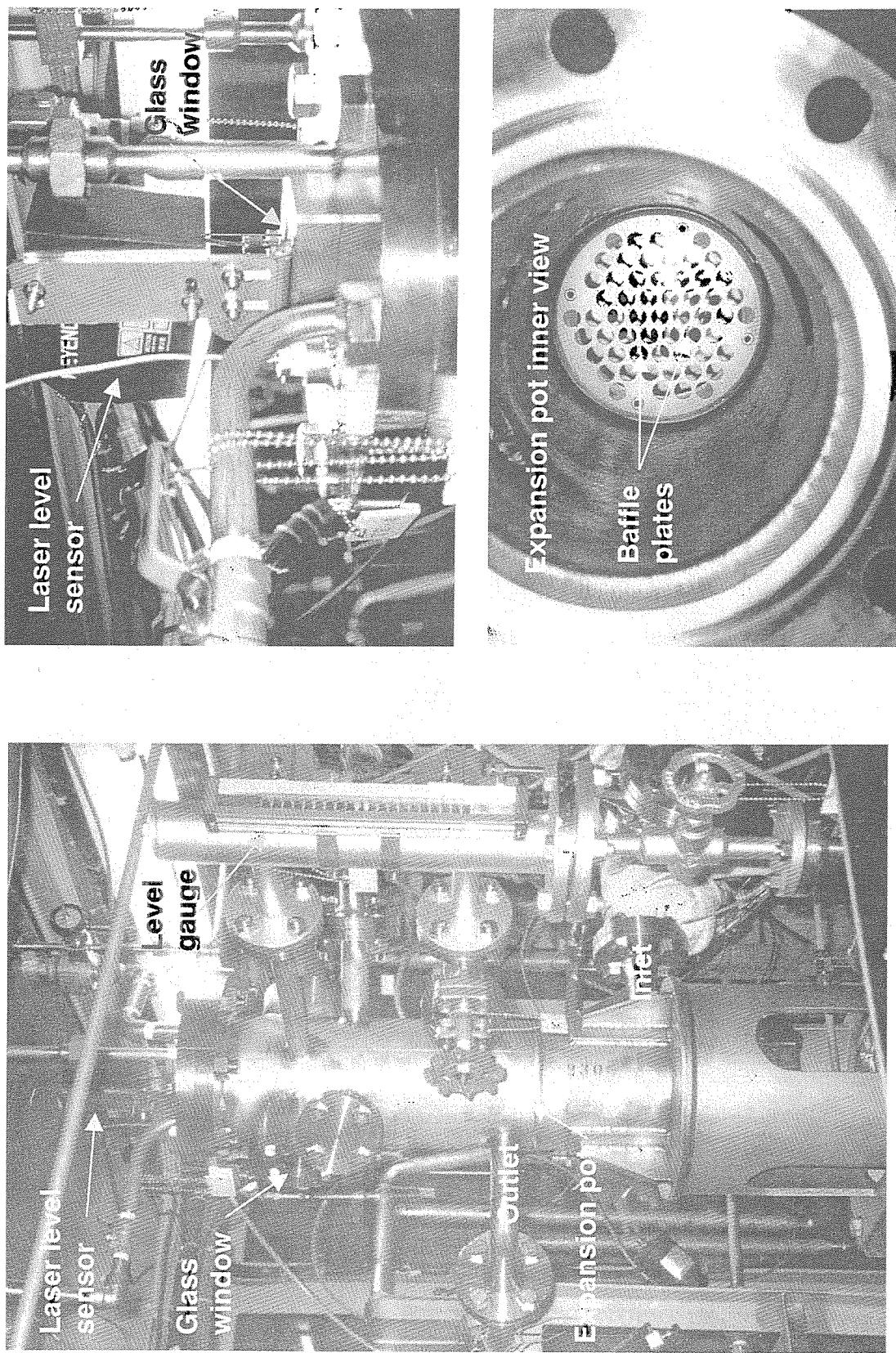


Photo 2.4 Modified expansion pot.

3. 異常時模擬試験計画

3.1 試験目的

生命・物質科学研究施設に設置するターゲットシステム（水銀ターゲット、液体水素減速材、反射体及びこれらの冷却材循環系）の開発は、前述したように、「良い中性子性能の実現と安全性の確保」を基本方針とし、放射線発生装置としての機能にエネルギー発生装置としての特徴を考慮しつつ進めている。このため、ターゲットシステムの安全の考え方は、放射線発生装置及びエネルギー発生装置としてのそれぞれの機能に対応するように次の2つの概念から成り立っている。

- ① 万一、配管破断等により核破碎生成物を含む水銀や、冷却材中のトリチウム等の放射性核種が放出されるような事態が生じても施設内の研究者・運転員等の従事者や、施設外的一般公衆に対する被曝を可能な限り低くするための放射線防護。
- ② 商用電源喪失や循環ポンプの機械的・電気的な故障のように、異常が生じても直ちに放射性核種の放出や放射線の漏洩等を伴わないが、放置しておくとターゲット容器や冷却系機器等の破損により重大な事象に発展する恐れのある事象が生じた場合、安全保護系等の働きにより機器の破損に至る前に事象の進展を阻止し、かつ、安全に収束させ通常運転に復帰できるようにする財産保護。

特に、核破碎生成物を多量に含む水銀循環系や可燃性を有する液体水素循環系については、他の冷却材循環系（軽水及び重水）に比較して潜在的な危険性が大きいので、これらの系統の安全性評価を先行して進めている。エネルギーフローの滯りに係わる安全性の評価では、水銀循環系や液体水素循環系の強制流動喪失時や配管破断時、流量、圧力の過渡変化時等の異常時におけるシステムの挙動を把握して、その結果から最適な安全保護系や制御系を設計し、システムとしての安全性を高めていく計画である。

ターゲットシステムで考えられる異常は、(1)発熱側に起因するもの、(2)除熱側に起因するもの、の大きく2つに分類することができる。ターゲットシステムの設計では、ターゲット部における発熱量に10%のマージンを考慮し、通常運転時の運転条件に余裕を持たせたて設計としており、発熱側あるいは除熱側の異常が生じても設計で考慮した余裕の範囲内において運転を継続することが可能であるが、異常時には、この余裕が無くなる前に異常を検出して、陽子ビームの入射を停止する等の措置を取らなければならない。そのためには、異常時のシステム過渡挙動を解析により把握し、通常運転時に許容する流量、温度、圧力等の各プロセス値の範囲を定め、その範囲を逸脱し設計で考慮した余裕が無くなる前に異常を検出して、システムを安全に停止するように安全保護系を設計する必要がある。解析に当たっては、システムの安全解析コードとして軽水炉で実績のあるRELAP5を選択した。

特に核破碎生成物を多量に生じる水銀循環系は、異常時においても水銀の沸騰（水銀のような液体金属の沸騰では、沸騰気泡が爆発的に成長して過大な圧力変動、流量変動を引き起こしやすい）を避けることを設計の基本方針としている。このため、水銀循環系において二相流と

なることは想定されず、二相流の解析が可能なコードを選定する必然性は無い。ターゲットシステムでは、水銀循環系の他に、重水や軽水を用いたターゲットケーシング冷却系、陽子ビーム窓冷却系、反射体冷却系、並びに液体水素を用いた冷減速材システムの水素循環系を同一のコードにより解析評価している。以上により、システム動特性解析に多くの実績を持つRELAP5コードを選択した。

水銀循環系の解析に当たっては、これまで水銀流動基礎実験装置（水銀ループ）をモデル化して水物性値を用いた予備解析⁽¹⁾及び水銀物性値の組込みを実施し⁽²⁾、RELAP5を水銀循環系に適用できるように整備するとともに、水銀物性値を用いた水銀ループ流量低下時等の異常時の解析を実施した⁽³⁾。液体水素を用いる冷減速材システムについては、水素及び窒素の物性値をRELAP5用に整備した。

本報では、異常時模擬試験のうち水銀循環系を対象とした試験計画について報告する。水銀循環系の異常時模擬試験は、試験結果に基づく水銀循環系解析モデルの最適化、RELAP5による解析結果の検証を目的として計画した。今回行う検証試験は、以下の2種類とする。

- ① 配管破断による冷却材喪失(LOCA)時のシステム応答試験
- ② ポンプトリップによる強制流動喪失(LOFA)時のシステム応答試験

3.2 配管破断による冷却材喪失 (LOCA) 時のシステム応答試験

配管破断によるLOCA時のシステム応答試験は、これまでの解析結果^{(6), (8)}に基づき配管破断時の模擬実験が可能のように、Fig.2.1に示すW028～W033のピストン弁及びボール弁の増設及びこれらを主配管及びドレンタンクに接続する配管を増設した。配管破断位置の違いがシステム動特性に及ぼす影響を明らかにするために、配管破断の位置は、ポンプ入口、ポンプ出口及び冷却器入口の3箇所とし、配管破断は瞬時にピストン弁（W028、W030、W032）を開放することにより模擬する。このとき、破断面積については、ピストン弁の手前に設けたボール弁（W029、W031、W033）の開度調節、または、ボール弁をオリフィス等に置き換えることにより設定する。また、破断時の流出流量に関しては、膨張ポットに設置したレーザー式液位計で液位の低下を測定することにより算出する。各値の測定及び記録はデータロガー及びオシロスコープを用いる。実験方法は以下の通りである。

- ① 水銀流動基礎実験装置を起動し、定常状態（圧力、温度、流量）となるよう設定する。
- ② 定常状態を確認した後、ピストン弁（W028、W030、W032）の1つを開放する。
- ③ 膨張ポット内の液位が100mm程度下がったところで加熱を停止する。
- ④ テストセクション温度が常温となった後、ポンプを停止する。

検証実験では、定常状態での流量及び加熱量をこれまでに実施した解析⁽⁸⁾における条件（約11L/min及び約5kW）とし、これを基準ケースとした。破断面積については、ボール弁の最大開放径10mmを基準ケースとし、解析で設定した開放径1mm、5mm、及び10mmに相当する

破断面積について試験を行う。

ここで、基準ケース（流量11L/min、加熱量5kW、開放径10mm）における解析例をFig.3.1(a)(b)に示す。破損位置（漏洩位置）については、ドレンタンクへの分岐管の接続部とした。解析では、流量約11L/minの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。

図に見られるように、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-0.5m/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。

この結果から水銀ループにおけるLOCAは緩やかな変化をしつつ終息して行くと考えられるが、実験によってこの傾向についての検証を行う。

3.3 ポンプトリップによる強制流動喪失(LOFA)時のシステム応答試験

ポンプトリップによるLOFA時のシステム応答試験についても、これまでの解析結果^{(6), (8)}に基づいて試験を行う。電磁ポンプ及びギアポンプの2種類のポンプが水銀流動基礎実験装置には設置しており、2種類のポンプについてそれぞれポンプ停止時の流動停止特性及びそれに伴った温度変化、圧力変化を測定する。これら2種類のポンプについてはポンプココストダウン特性が明確でないため、実験で測定される結果からコストダウン特性を求めてコードへ組み込む予定である。実験方法は以下の通りである。

- ① 水銀流動基礎実験装置を起動し、定常状態（圧力、温度、流量）となるよう設定する。
- ② 定常状態を確認した後、ポンプの電源をOffとする。
- ③ 加熱テストセクション部での温度上昇が20°C以上となったところで加熱を停止する。

ポンプトリップ時の検証実験においても、LOCA時の試験と同様に、定常状態での流量及び加熱量をこれまでに実施した解析⁽⁸⁾における条件（約11L/min及び5kW）とし、これを基準ケースとした。また、過渡時のポンプ揚程の変化を精度良く測定するためポンプ出口に圧力計を追設してポンプ出口圧力の変化を計測する。

ここで、基準ケースにおける解析例を示す。解析は、流量約11L/minで定常状態にある状態からポンプが停止し、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。この時、ポンプの停止特性を表す慣性モーメントはポンプ時定数に換算して一般的な遠心式ポンプの時定数に近い $T=0.5\text{sec}$ となる値とした。

Fig.3.2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。一方、ピーク値をすぎてからの温度変化は、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。

この結果から水銀ループにおけるLOFAは緩やかな変化をし、過大な熱上昇等がなく終息して行くと考えられるが、実験によってこの傾向についての検証を行う。

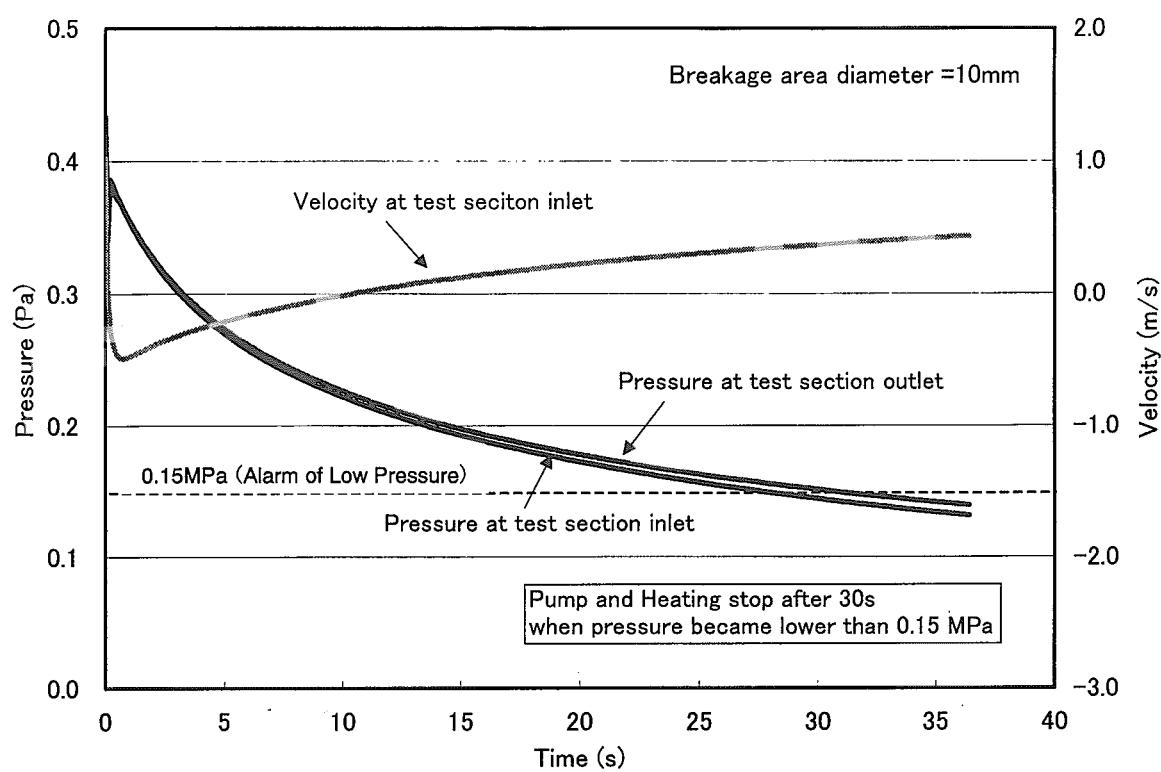


Fig.3.1(a) Temperature and velocity changes during loss of coolant accident (LOCA)
(Breakage area diameter : 10mm)

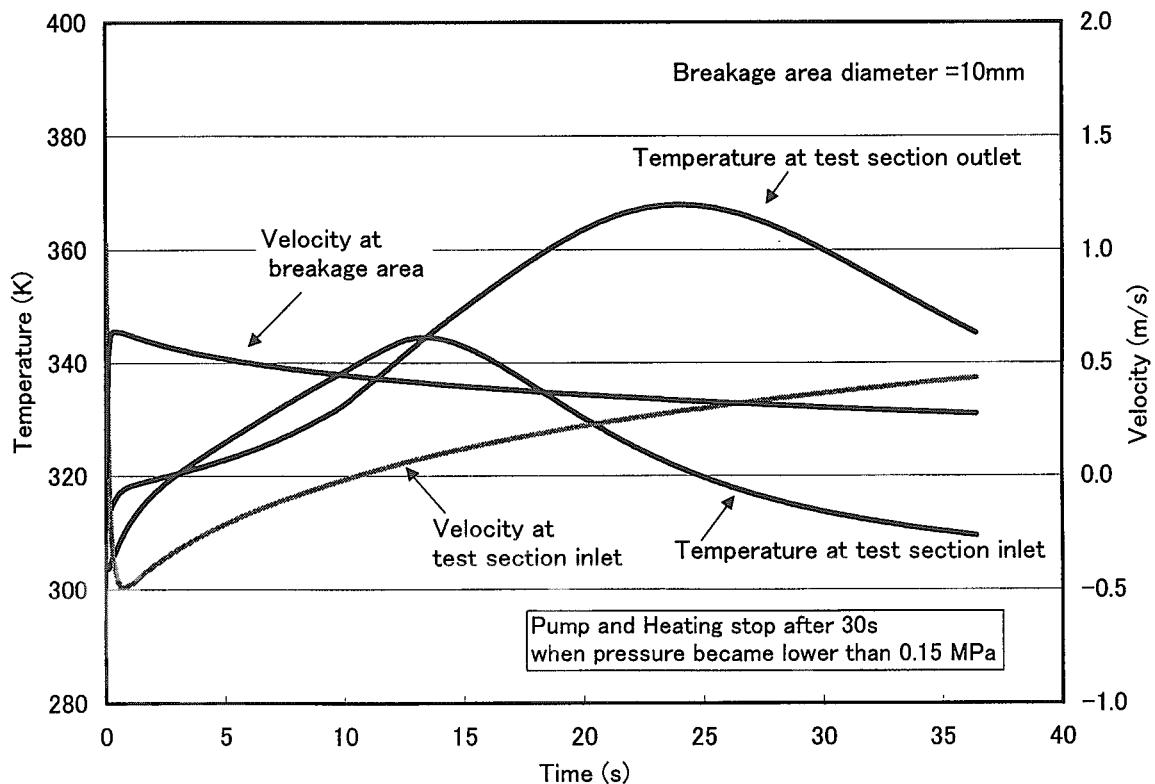


Fig.3.1(b) Temperature and velocity changes during loss of coolant accident (LOCA)
(Breakage area diameter : 10mm)

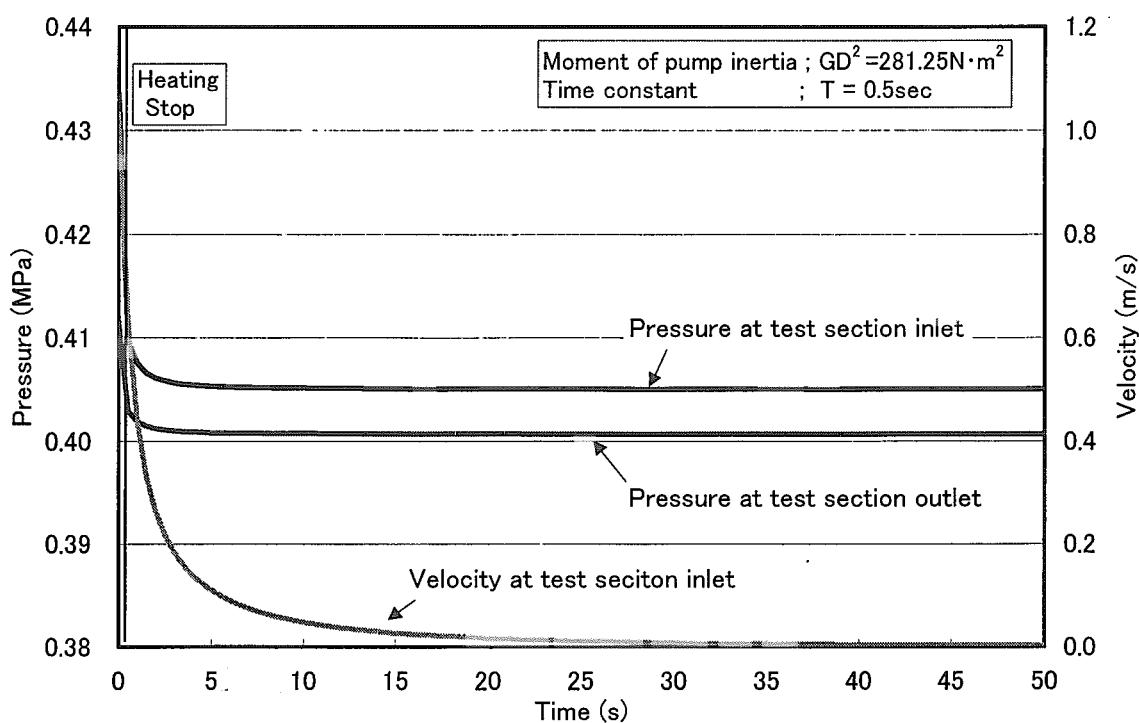


Fig.3.2(a) Pressure and velocity changes during loss of forced convection accident (LOFA) caused by pump trip

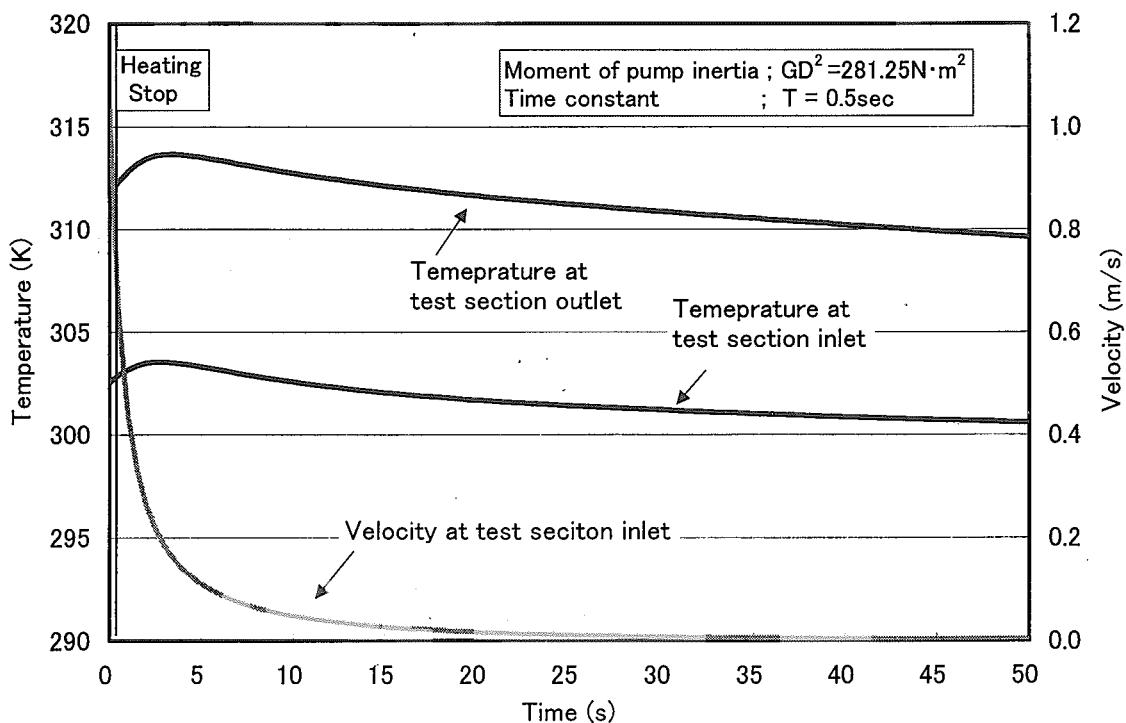


Fig.3.2(b) Temperature and velocity changes during loss of forced convection accident (LOFA) caused by pump trip

4. 結 言

核破碎水銀ターゲットシステムの設計では、水銀の使用と核破碎生成物の内包からシステム異常時の過渡挙動を把握し、異常を早期に検出して安全に収束させるための検出手法や安全保護系の概念構築が急務となっており、これまで RELAP5 を用いた解析評価を進めてきた。

実機水銀ターゲット及び流動システム過渡特性を解析的評価に資するため、水銀流動基礎実験装置を用いて行う解析コード及びモデル検証試験の実施計画を策定した。本実験装置を用いて LOFA や LOCA の検証試験を行うにあたっては、水銀流出量を精度良く計測可能なように、実機で採用可能な技術の先行試験を兼ねて、レーザー方式液位計を膨張ポットに設置するとともに、膨張ポット内の水銀液位の変動を抑制するためにバッフル板を膨張ポット内に設置した。レーザー方式液位形及び膨張ポット内バッフル板の有用性については予備実験により実証した。本試験で得られた結果を解析コード及びモデル検証に反映することで、今後のターゲットシステム設計に生かして行く予定である。

謝 辞

水銀基礎流動試験装置の製作・据付に当たり、株式会社 日立製作所 中村文人氏、日立エンジニアリング株式会社 菅谷純一氏、田中弥氏には多大なる支援・協力を戴いた。水銀用電磁ポンプ及び電磁流量計の導入に際しては、助川電気工業株式会社 栗本泰夫氏、山本 宏氏に多大なる支援を戴いた。また、本報告書をまとめるに当たり、核熱利用研究部熱利用システム研究室 武田哲明氏には貴重な助言を戴いた。ここに記し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
- (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) 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 3 報 水銀物性値を用いた過渡解析）”、JAERI-Tech 2000-007、2000
- (4) 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 管壁摩擦係数測定試験及び今後の試験計画）”、JAERI-Tech 99-051、1999
- (5) 神永雅紀、木下秀孝、羽賀勝洋、日野竜太郎、中村文人、大橋雅久、”水銀流動基礎実験（第 2 報 水銀循環用ギアポンプ特性）”、JAERI-Tech 2000-044、2000

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

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

表3 固有の名称をもつSI組立単位

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

表2 SIと併用される単位

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

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

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

(注)

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

換算表

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

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

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

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
	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	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)
仕事・熱量	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 ⁶	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(仮馬力)
	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

水銀流動基礎実験(第3報)異常時模擬試験計画

R100

古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています。