

JAERI-Tech
2002-052



JP0250276



水銀流動基礎実験（第4報）
水銀流動によるエロージョン量の測定

2002年6月

木下 秀孝・神永 雅紀・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, 2002

編集兼発行 日本原子力研究所

水銀流動基礎実験（第4報）
水銀流動によるエロージョン量の測定

日本原子力研究所東海研究所大強度陽子加速器施設開発センター

木下 秀孝・神永 雅紀・羽賀 勝洋・日野 竜太郎

（2002年4月19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・物質科学に関する新しい研究領域を開拓するため、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、核破砕反応により発生した大強度の中性子を物質・生命科学等の先端分野の研究に利用する予定である。核破砕水銀ターゲットシステムの設計では、高い信頼性と安全性を確保しつつ中性子性能を確保することを目指している。安全性に関しては、ターゲットに液体金属である水銀を使用し、かつ、核破砕生成物を内包することから、システムの健全性の評価が重要となる。水銀流動システムの配管及び各機器は水銀による流動浸食（エロージョン）により損傷を受ける可能性がある。本報告書は、水銀流動システムのエロージョン量評価のため水銀流動基礎実験装置で行った管壁の厚さ変化の測定試験について述べたものである。試験は水銀流動基礎実験装置にエロージョン試験用配管及び試験片を組み込み、水銀を流動させて1000時間毎に管壁及び試験片の厚さ変化を超音波厚さ計により測定した。試験結果より、流速が0.7m/sと実機条件を上回る場合でも配管でのエロージョン量は1000時間で約3 μ mであった。施設の寿命を30年と想定した場合でもエロージョンによる減肉は0.5mm以下と評価され、機器の健全性に対する影響は極めて小さいことを確認した。また、ドレン時の水銀配管への残留水銀量測定で約19g/m²の水銀が配管内部に付着していた。この量を評価すると、150A-sch80配管1mあたり8.5g程度、水銀ターゲット容器の場合には40gが残留することが想定される。ターゲット内の水銀の残留放射能は 1.2×10^{12} Bqであり、ターゲット容器の放射化量 1.0×10^{15} Bqと比べてはるかに小さくターゲット保管時の放射線量への影響は非常に低いものとなる。

Mercury Flow Experiments
(4th Report ; Measurements of Erosion Rate Caused by Mercury Flow)

Hidetaka KINOSHITA, Masanori KAMINAGA, Katsuhiro HAGA and Ryutaro HINO

Center for Proton Accelerator Facilities
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 19, 2002)

The Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) and the High Energy Accelerator Research Organization (KEK) are promoting a construction plan of the Material-Life Science Facility, which is consisted of a Muon Science Facility and a 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 neutron generated by the spallation reaction of a 1MW pulsed proton beam and mercury target. Design of the spallation mercury target system aims to obtain high neutron performance with high reliability and safety. Since the target system is using mercury as the target material and contains large amount of radioactive spallation products, it is necessary to estimate reliability for strength of instruments in a mercury flow system during lifetime of the facility. Piping and components in the mercury flow system would be damaged by erosion with mercury flow, since these components will be weak by thickness decreasing. This report presents experimental results of wall thickness change by erosion using a mercury experimental loop. In the experiments, an erosion test section and coupons were installed in the mercury experimental loop, and their wall thickness was measured with an ultra sonic thickness gage after every 1000 hours. As a result, under 0.7m/s of mercury velocity condition which is slightly higher than the practical velocity in mercury pipelines, the erosion is about $3\mu\text{m}$ in 1000 hours. The wall thickness decrease during facility lifetime of 30 years is estimated to be less than 0.5mm. According to the experimental result, it is confirmed that the effect of erosion on component strength is extremely small. Moreover, a measurement of residual mercury on the piping surface was carried out. As a result, 19g/m^2 was obtained as the residual mercury for the piping surface. According to this result, estimated amount of residual mercury for 150A-sch80 piping is 8.5g/m, and for the mercury target is about 40g. As for the target, radioactivity of the remained mercury is 1.2×10^{12} Bq, which is extremely lower than the radioactivity of the target which is estimated to be 1.0×10^{15} Bq. Based on the result, it can be concluded that the radioactivity of residual mercury is relatively low compared with that of the mercury target, and there is no influence for maintenance and storage of the spent mercury target.

Keywords : Mercury Flow System, Piping, Erosion, Mercury Experimental Loop, Component Strength,
Wall Thickness, Residual Mercury

This is a blank page.

目 次

1. 緒 言	1
2. 試験装置の概要	5
2.1 水銀流動基礎実験装置とエロージョン試験配管	5
2.2 実験方法と実験条件	5
3. 実験結果	15
3.1 エロージョン量測定結果	15
3.2 水銀付着量測定結果	16
4. 結 言	27
謝 辞	27
参考文献	28

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of Experimental Facility	5
2.1 Mercury Experimental Loop and Erosion Test Section	5
2.2 Experimental Method and Experimental Conditions.....	5
3. Experimental Results	15
3.1 Results of Erosion Test	15
3.2 Estimation of Residual Mercury Attached with Piping Inner Surface	16
4. Concluding Remarks	27
Acknowledgement	27
References	28

1. 緒 言

日本原子力研究所（原研）は高エネルギー加速器研究機構（KEK）と共同して、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計画を進めている⁽¹⁾。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生命・物質科学等の先端分野の研究に利用する予定である。

Fig.1.1に中性子散乱施設を中心とした生命・物質科学研究施設の概念図を示す。本施設は中央に陽子ビームライン、核破碎ターゲットステーション等を設置し、その両側にミュオンを含む中性子実験エリア、さらに、陽子ビームライン下流側に各種ユーティリティやメンテナンス用のホットセルを配置している。Fig.1.2に核破碎ターゲットステーションの概要を示す。厚さ約5mの生体遮蔽体内部に中性子ビームシャッター、反射体／減速材アセンブリー、中性子導管、陽子ビーム窓等を設置し、水銀ターゲットは水平方向に移動可能なターゲット台車先端に設置し、反射体／減速材アセンブリーの所定の位置に配置するようにしている。ターゲット容器は定期的に交換するため、隣接したホットセルでパワーマニピュレータ、マスタースレーブマニピュレータ及び天井走行クレーンを用いて遠隔操作で交換する。ホットセルの地下には使用済ターゲット容器の保管設備を配置している。

Fig.1.3にターゲット台車（トローリ）及び水銀循環システムの概要を示す。ターゲット台車には前述した水銀ターゲットを生体遮蔽体の先端部に設置し、生体遮蔽体の後方には水銀循環システムを搭載する。ターゲット台車は幅2.5m、全長が約12mで、重量は約300tである。そのうちの約70%が遮蔽体である鉄の重量である。台車に搭載される水銀循環システムは、水銀ポンプ、熱交換器、電磁流量計、サージタンク等で構成され、水銀保有量は約1.7m³、定格循環水銀量は40m³/hrで、このときの配管内水銀平均流速は約0.4m/sである。

水銀ターゲット及び水銀循環システムにおける水銀流動に関しては、水銀流動基礎実験装置を用いて熱流動試験やポンプ試験等の実験を既に行い、ターゲット及び循環システムの設計に必要なデータを取得した^{(2),(3)}。ただし、液体金属である水銀の流動により、配管、水銀ターゲット容器内部等で発生する流動浸食（エロージョン）については、構造強度の低下を招く可能性があることから、水銀流動基礎実験装置を用いて約700時間のエロージョン予備試験を実施した⁽⁴⁾。水銀のエロージョンについては世界的にデータがほとんどなく、また、水銀流動システムの中でも特に水銀配管に関しては施設の寿命(30年を想定)中に交換せずに使用することを想定しているため、さらに長時間の連続流動運転による試験を行い、配管のエロージョンによる減肉量を定量的に評価しておく必要がある。また、エロージョンは水銀と配管等流体機器との摩擦によって起きるので、水銀流速の影響について考慮する必要がある。

一方、水銀ターゲット容器の交換や機器のメンテナンスは、水銀をドレンタンクに排出した後に行うこととしている。この時、水銀ターゲット容器、機器及び配管の内部表面には水銀が付着して残留することが考えられる。この残留水銀中には核破碎生成物が含まれるため、交換あるいはメンテナンス作業時における空間線量率の評価や、水銀の蒸発による気体状放射性物質の評価のために残留水銀量を定量的に把握しておく必要がある。

そこで、水銀流動基礎実験装置を用いて約3000時間にわたるエロージョン試験を行い、エロージョンによる配管の減肉量の定量的な評価を行うとともに、エロージョン試験用配管内部に付着した残留水銀量の定量的な評価を行った。本報告書ではそれらの結果について述べるとともに、30年の運転期間中に想定される減肉量、実機水銀ターゲット内部に付着残留する水銀量を評価した結果等について報告する。

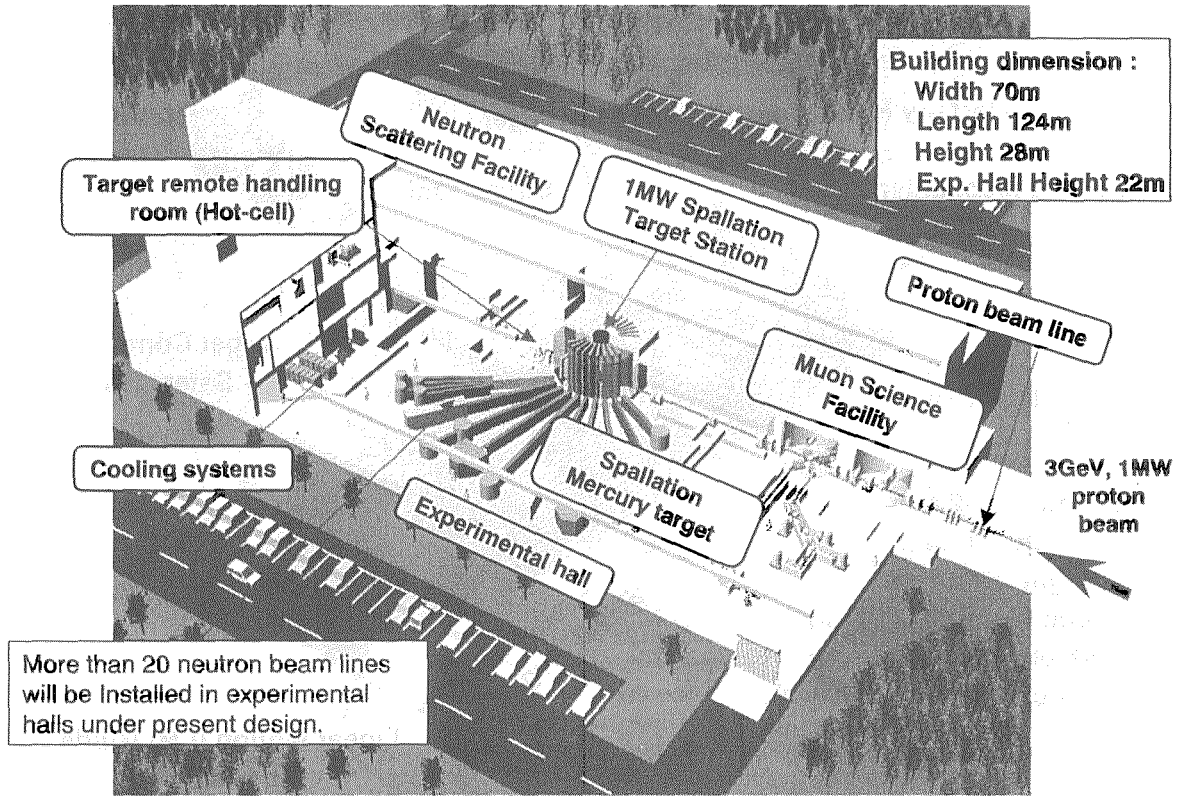


Fig.1.1 Material Life Science Experimental Facility

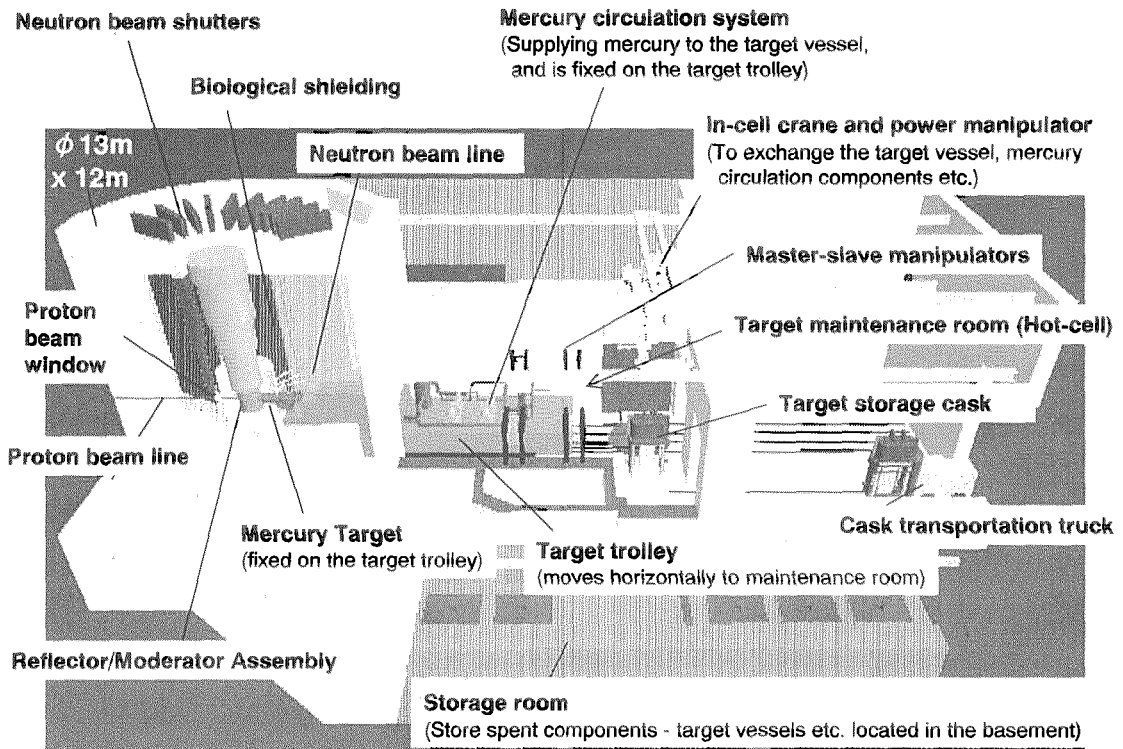


Fig.1.2 Target Station

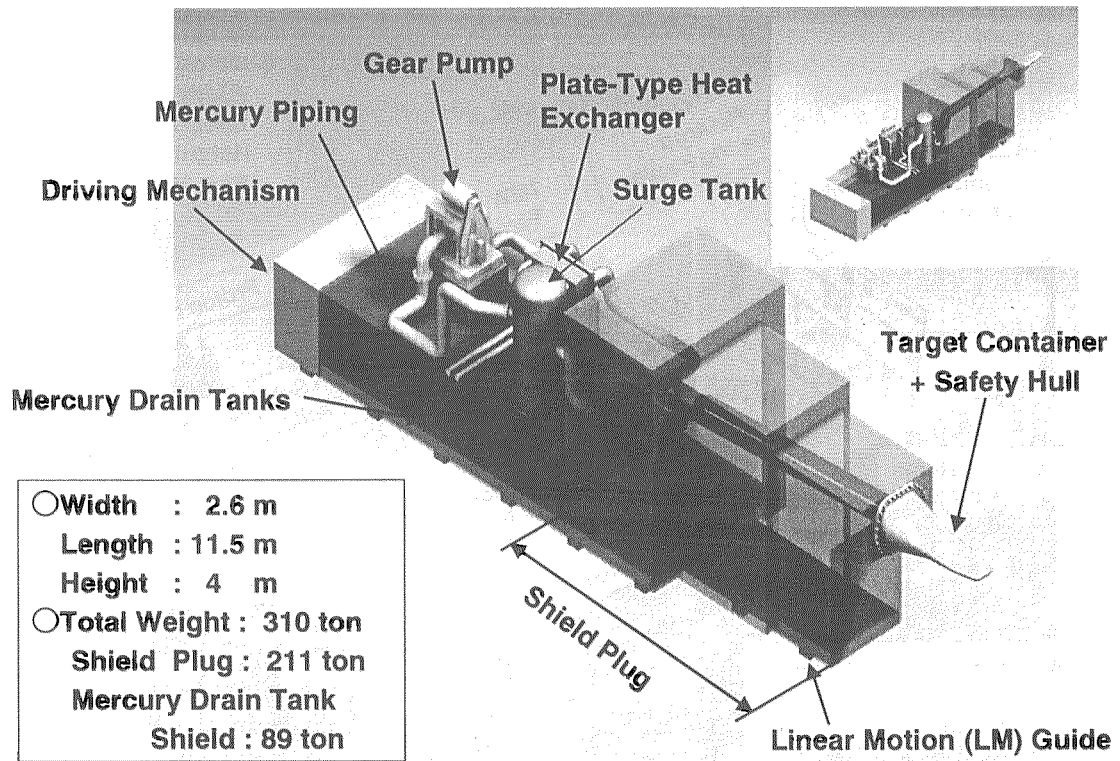


Fig.1.3 Mercury Circulation System and Target Trolley

2. 試験装置の概要

2.1 水銀流動基礎実験装置とエロージョン試験配管

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、また、フローシートを Fig.2.1 に示す。水銀流動試験装置は、配管全長が約 11m、保有水銀量が約 0.01m³の小型の水銀ループで、その循環水銀流量は実機水銀ループの約 1/35 である。水銀ループは、各種試験を行う試験部、ガスによってループ全体を加圧するための膨張ポット、熱交換器、電磁ポンプ、ギアポンプ、電磁流量計、及びループのメンテナンスを行う際に水銀をドレンするドレンタンクで構成されている。水銀の外部への漏洩を防ぐためにループは鋼製のパンの上に設置し、水銀蒸気の外部への拡散を防ぐために、ループ周囲はアクリル板を張った実験ボックスで覆い、内部の空気はチャコールフィルターを経由して排気している。

Photo2.2 に予備試験に用いた加熱試験用流路の外観を示す。全長は約 1m で、内径は 14.3mm である。Fig.2.2 には、エロージョン試験流路の構成を、また、Photo 2.3 にはエロージョン試験流路の外観を示す。エロージョン試験流路はステンレス製の配管(O.D=21.7mm, I.D=14.3mm)をエルボとレデューサを用いてフランジで接続した構造で全長は約 1.4m である。試験流路には幅 10mm、長さ 40mm で厚さ約 1.9mm の SUS316 製の試験片(クーポン)をフランジに設けた溝に挿入して固定している。水銀流量はエロージョン試験配管を設置した条件において、電磁ポンプを用いた場合に最大約 $7 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$ 、ギアポンプの場合で最大 $2 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{min}$ である。

2.2 実験方法と実験条件

実験は、水銀流動基礎実験装置に設置したエロージョン試験用配管を約 1000 時間の運転毎に取り外し、残留水銀量を計測するため配管に付着した水銀を超音波洗浄槽で取り除いた後、各測定点毎の管壁厚さを超音波厚さ計を用いて測定し、運転時間毎の厚さ変化によってエロージョン量(配管減肉量)を評価した。Fig.2.3 にエロージョン試験配管の管壁厚さ測定位置を示す。測定点は A~Q までの 17カ所で各点は、直管部分、レデューサ及びエルボの各部分においてそのほぼ中央部分である。また、円周方向での違いの有無を確認するために、円周方向に 0~270° の 4カ所の測定点において管壁厚さを測定した。クーポンについてはマイクロメーターと超音波厚さ計の双方で中央部分の厚さを測定した。なお、厚さの測定は同一箇所を 3 回計測し、その平均値を用いた。管壁厚さ測定に用いた超音波厚さ計の外観を Photo2.4 に示す。厚さ測定用の探触子がストレートのものと 45° 傾いたものの 2 種類あり、測定箇所によって使い分けた。測定は探触子先端部分が垂直に配管外表面に当たるようにし、ディスプレイで波形が正しく表示されていることを確認しつつ厚さを確定した。超音波厚さ計の仕様を以下に示す。

超音波厚さ計

製造 : 日本パナメトリクス株式会社
 製品 : A-スキャンディスプレイ付き超音波厚さ計
 型式 : 厚さ計 MODEL 25DL PLUS

- 測定範囲 : 0.080~500mm (材料・探触子のタイプによる)
 測定精度 : 0.001mm
 測定方式 : 「パルス/エコー」原理により以下の式で算出する。

$$x=V(t-t_0)/2$$

x : 材料厚さ

V : 材料の中における音速

t : 測定したパルスの往復通過時間

t₀ : ゼロオフセット要素 (探触子のウェアプレート遅延、ケーブル遅延、他の固定遅延の調整)

探触子 : コンタクト探触子 (V260-SM、V260-45)

今回の実験では、電磁ポンプを用いて約 $7 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$ の流量条件で試験を行った。この場合の試験配管での流速は約 0.7m/s となる。Fig.2.4 に今回の実験における水銀温度と流速を示す。水銀温度に違いがあるのは、図中に示すとおり熱交換器に使用している冷却水温度が季節により変化するためであり、それに伴って流速も若干変化している。今回の実験条件を以下に示す。

入口圧力	;	約 0.38 MPa
入口水銀温度	;	約 35 ~ 50 °C
流速 (テストセクション)	;	約 0.7 m/s
(クーボン部)		約 0.3 m/s

また、厚さ測定に先立って配管を洗浄した際に取り除いた水銀に関しては、超音波洗浄槽に設置している水銀溜めで集めた後、水銀重量を化学天秤で量り、配管内表面へ付着した残留水銀量評価を行った。超音波洗浄槽の外観を Photo2.5 に示す。超音波洗浄槽は大きさが幅 1.4m、奥行き 0.5m、深さ 0.45m で、内部に超音波振動子を 3 台設置した。内部には洗浄する配管等が発振器の下へ落ちないように金網のかごを設置した。下部に設置した水銀溜はガラス製で水銀を溜めた後、洗浄槽より取り外して水銀を補集できるようにした。以下に超音波発振器の仕様を示す。

超音波発振器

型式	:	UE-1200Z38S-2A
外形寸法	:	262W×450L×154H [mm]
所用電源	:	単相 200V 50Hz 約 2.4kW
出力	:	1200W

超音波振動子

型式	:	UT-30Z38/24-98X005
外形寸法	:	440W×300L×73H [mm]
照射面積	:	400×300 [mm]
周波数	:	38kHz

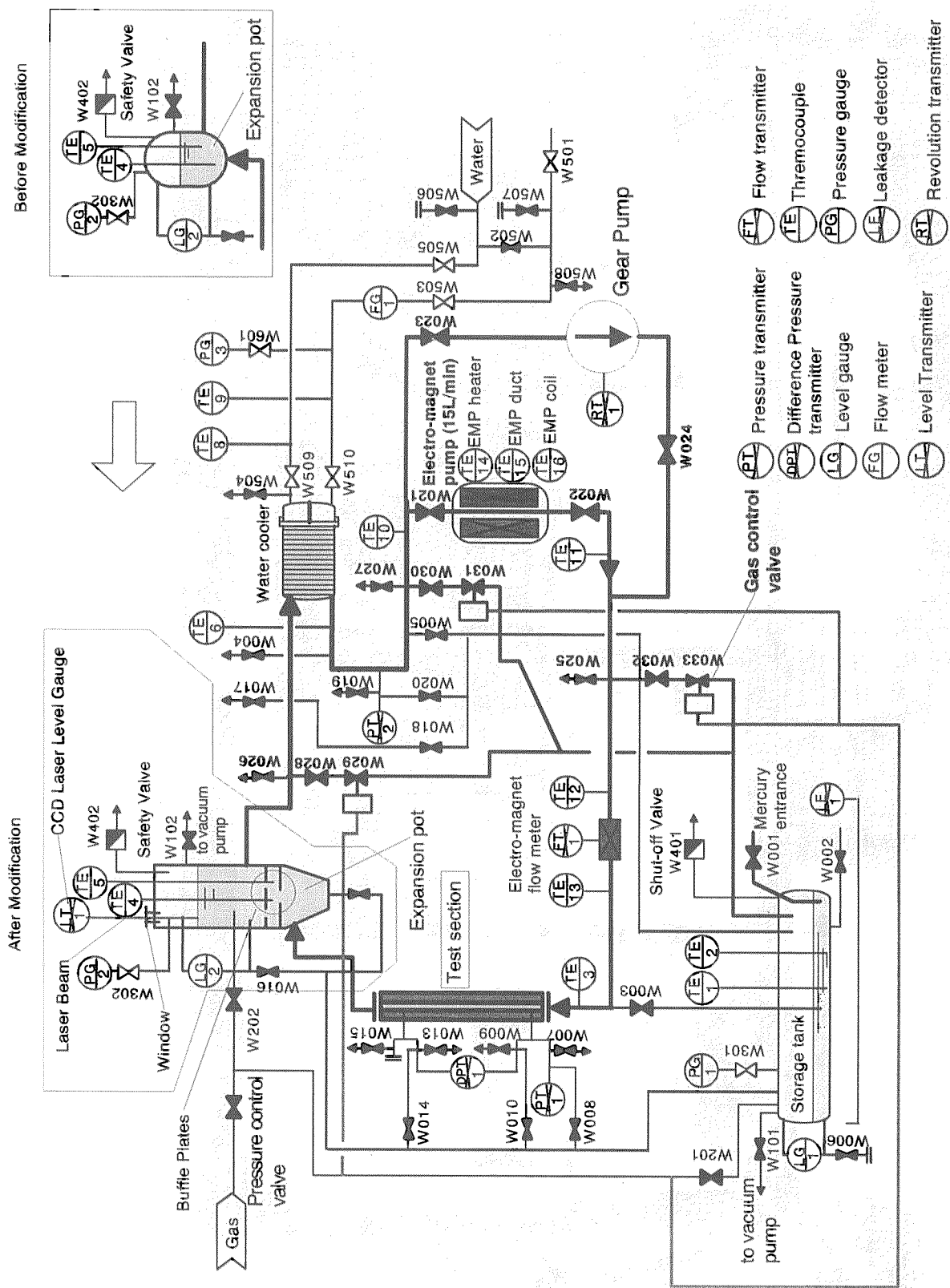


Fig. 2.1 Schematic diagram of the mercury experimental loop

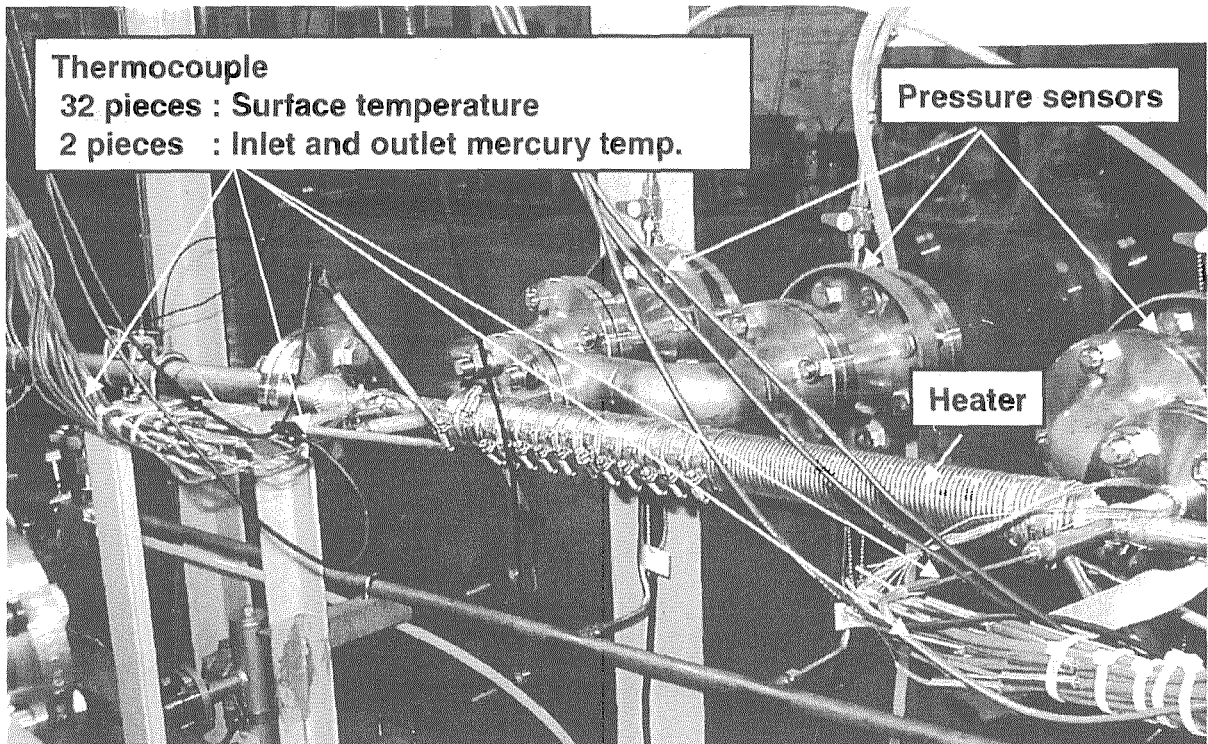


Photo 2.2 Straight Pipe Test Section for Preliminary Erosion Test
(The heat transfer test section was applied to the test.)

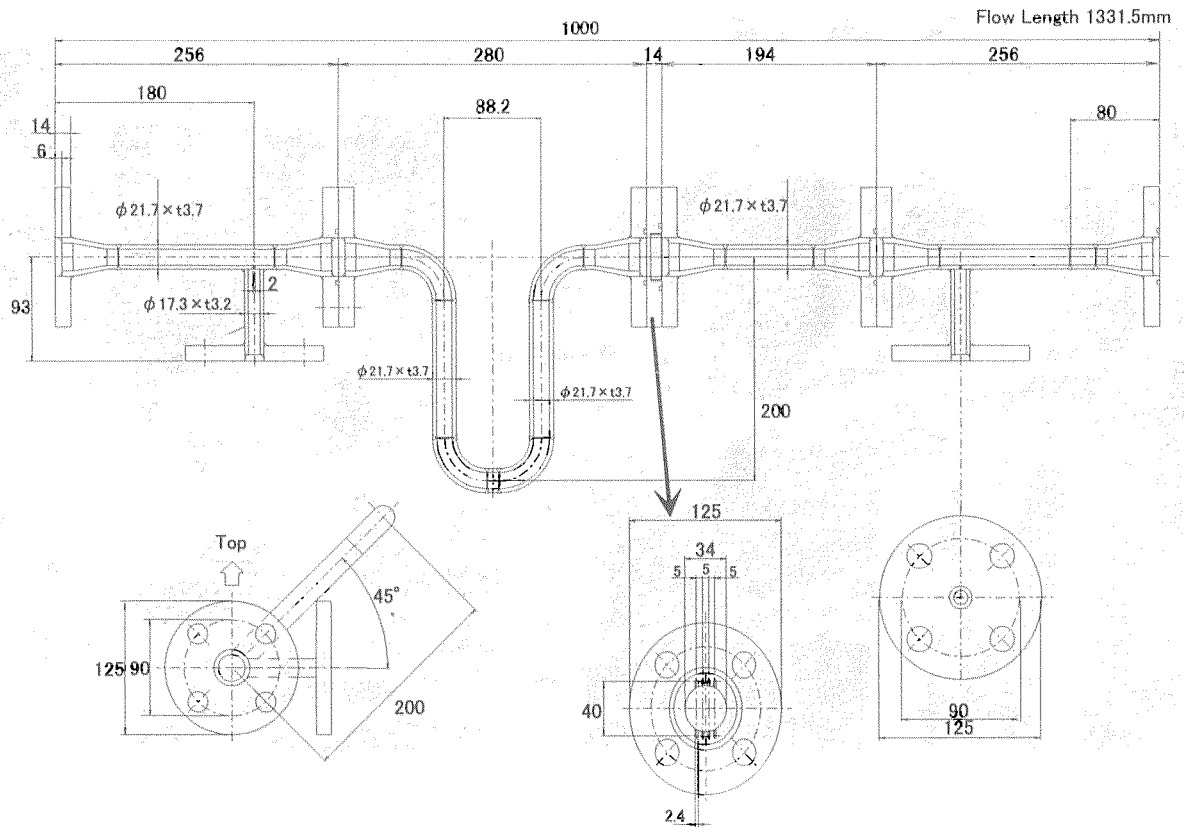


Fig. 2.2 Schematic Drawing of Erosion Test Section

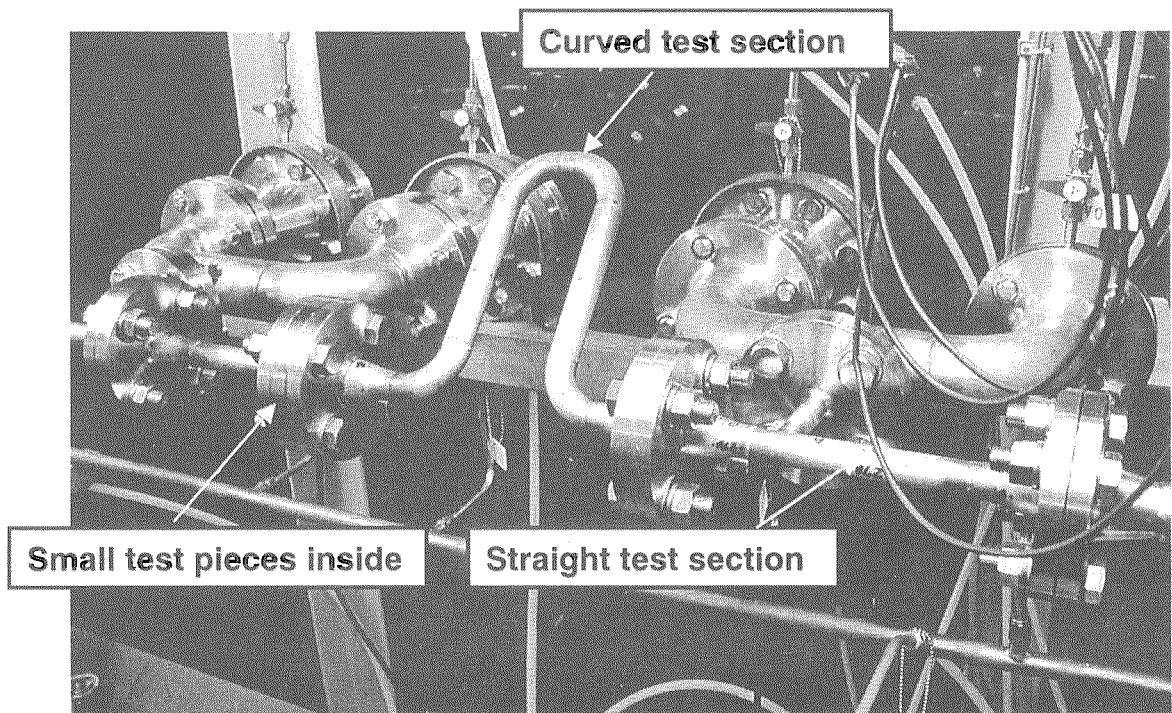
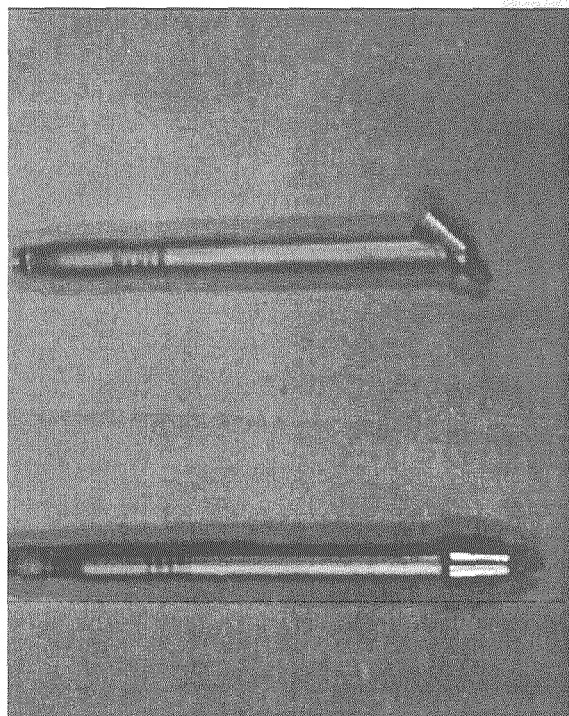
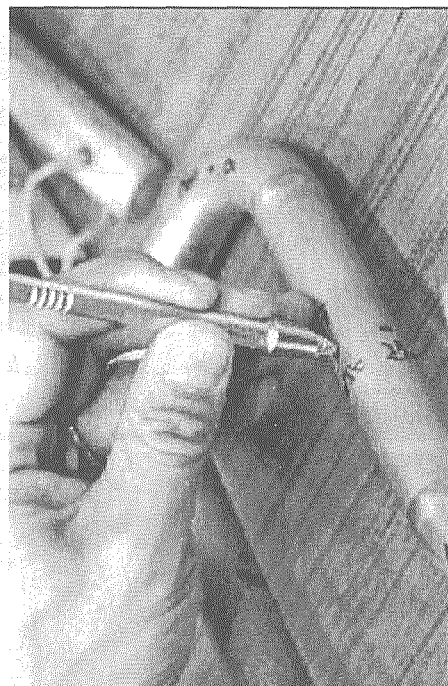


Photo 2.3 Erosion Test Section



90° Transducers 45°



View at Measuring



Photo 2.4 Outer View of Ultra Sonic Thickness Gage

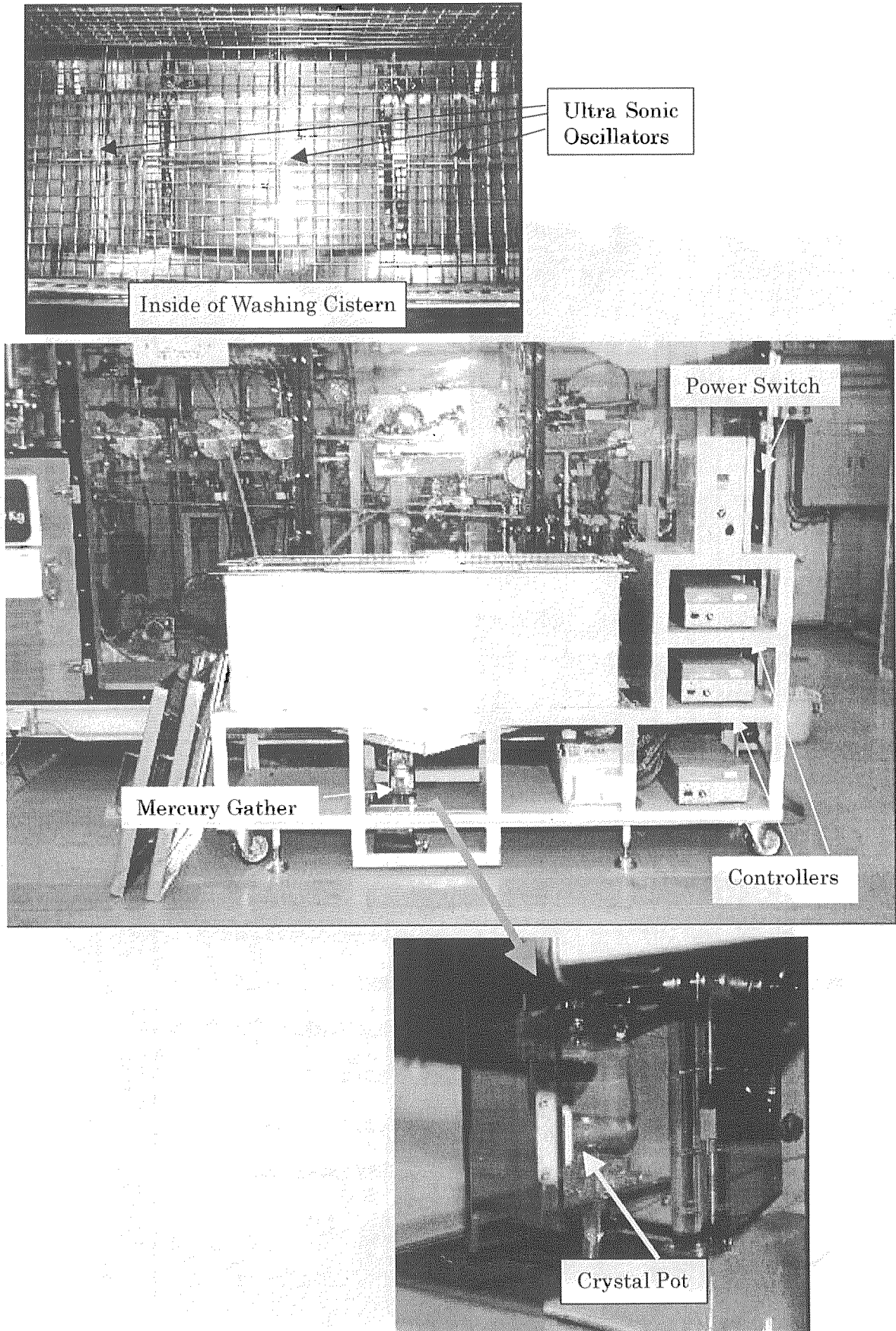


Photo 2.5 Outer View of Ultra Sonic Washer for Test Section

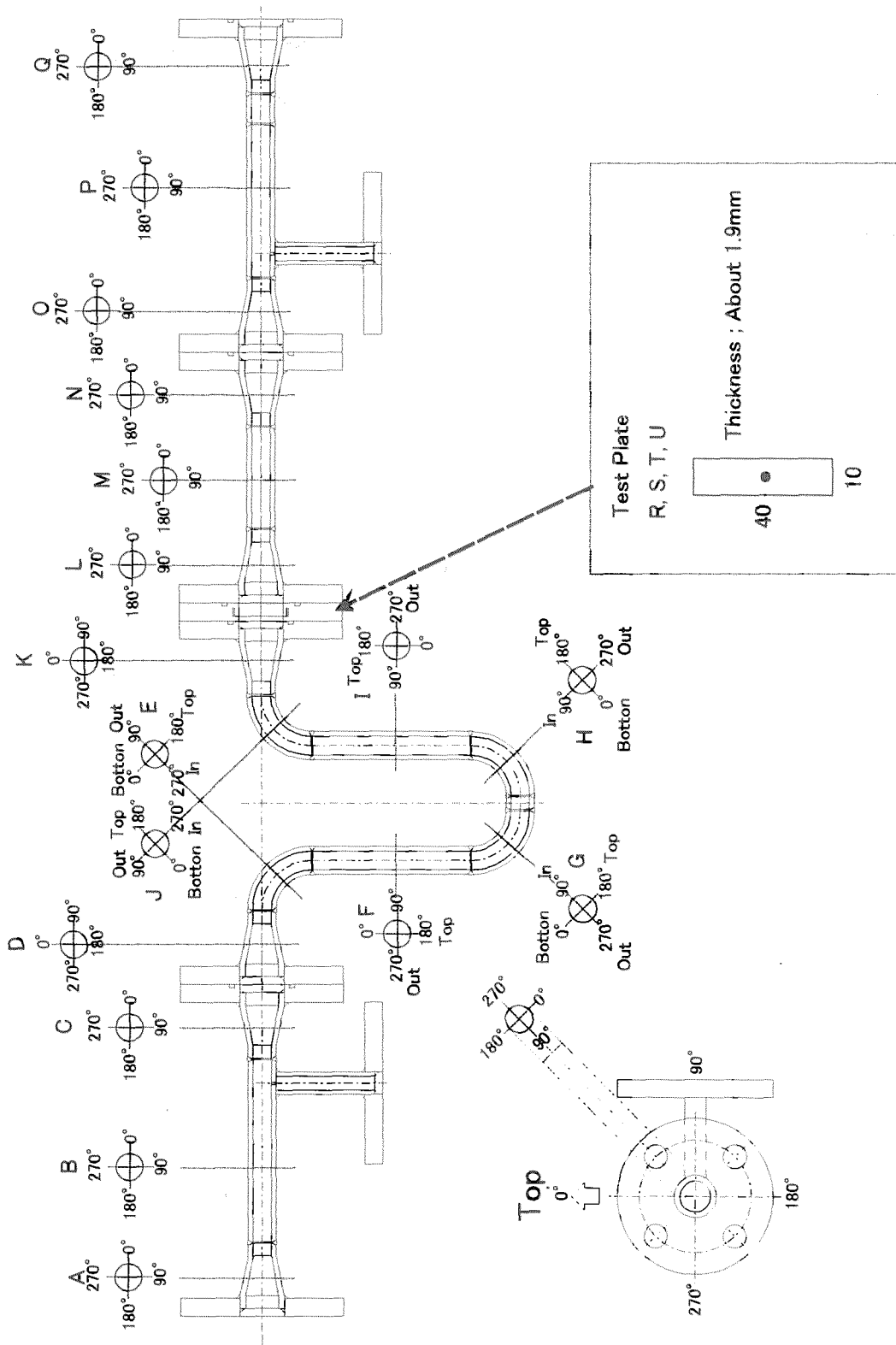


Fig.2.3 Measurement Point of Tube Wall Thickness

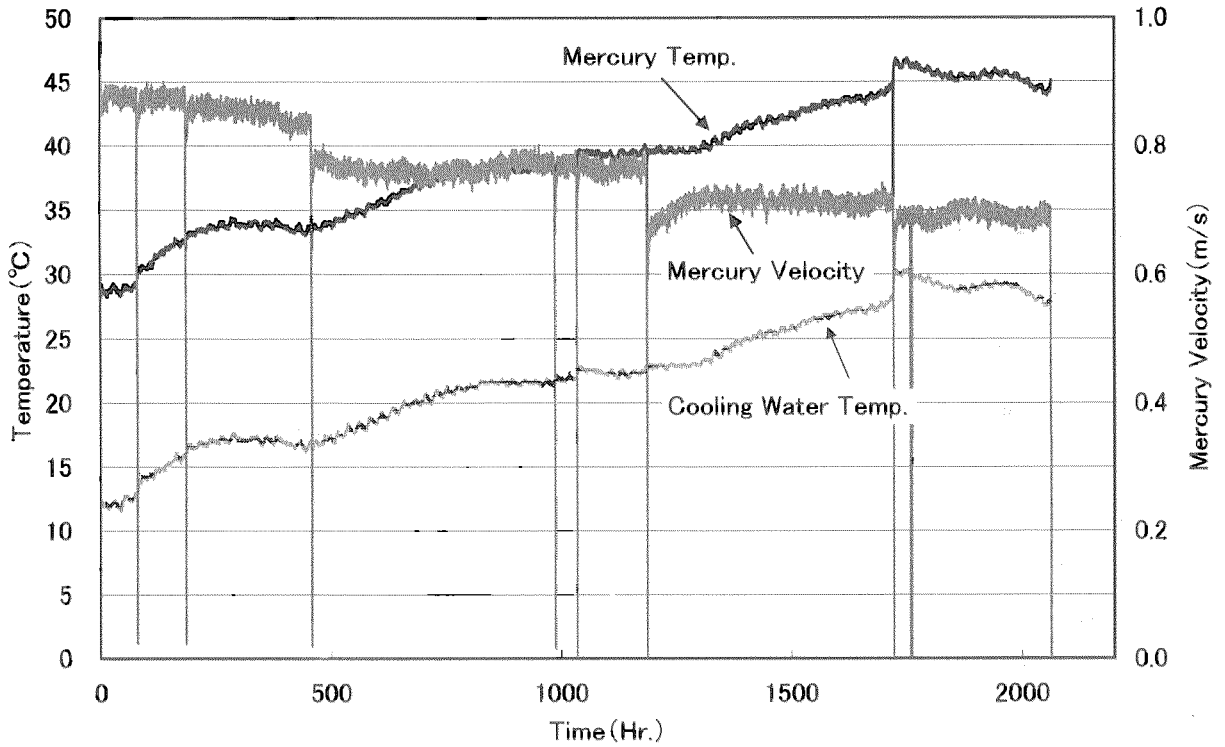


Fig.2.4(1) Temperature and Velocity History during Erosion Test (0~2000 hours)

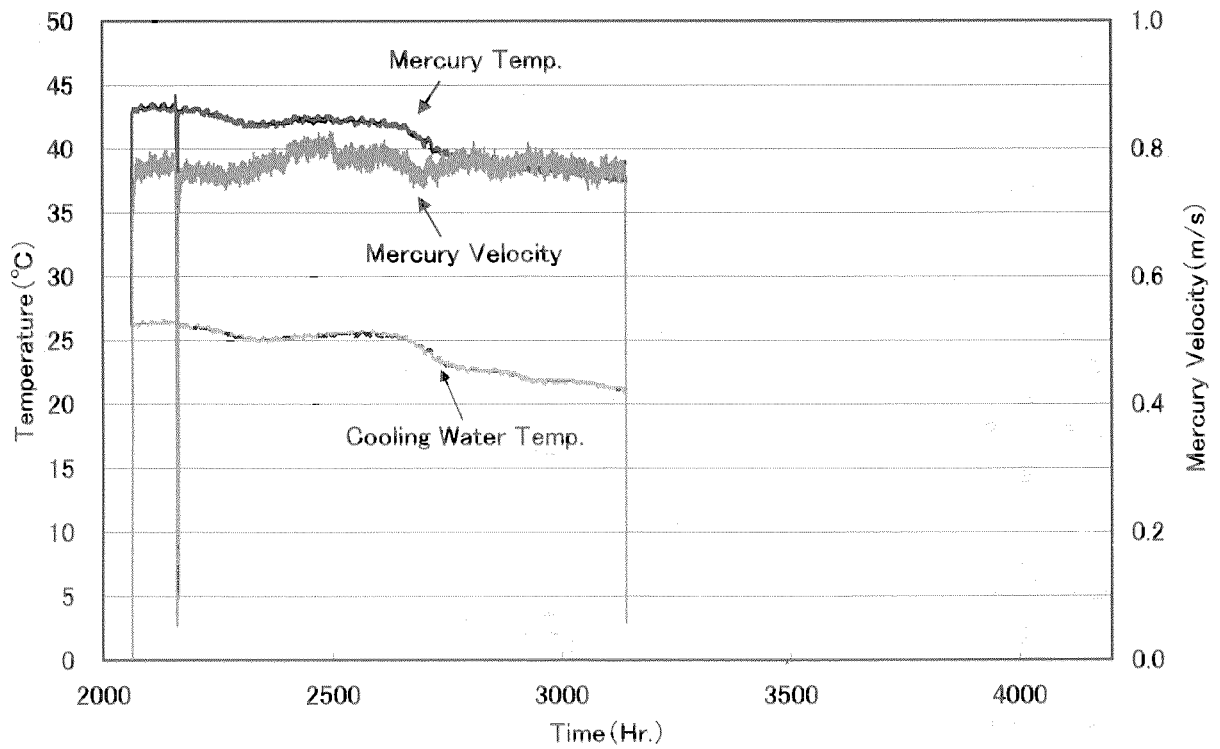


Fig2.4(2) Temperature and Velocity History during Erosion Test (2000~3000 hours)

3. 実験結果

3.1 エロージョン量測定結果

まず、エロージョン試験配管を設置する前に行った予備試験結果について示す。予備試験は、加熱試験用配管の内径をマイクロメーターとシリンダーゲージを用いて測定し、試験配管の厚み変化を評価した。試験時間は668時間で、試験部における流速は1.0m/sである。各点の内径の測定結果をTable 3.1に示す。また、測定位置をFig.3.1に示す。表に示したように、668時間後の内径は測定前に比べ、シリンダーゲージの分解能を考慮すると0.01mm増大し、約5 μ mの減肉を予測できる。この結果を基にエロージョンが時間に比例すると考えた場合、中性子散乱施設で計画している1年間の運転時間、5000時間に換算すると約28 μ m、30年使用した場合には約840 μ mの減肉が予測される。すなわち、30年でも1mm以下の減肉である。

次に、エロージョン試験配管を用いた実験結果を示す。Table3.2、3.3、3.4、3.5に試験前及び約1000、2000、3000時間における管壁厚さ測定結果を示す。ただし、試験前の管壁厚さの測定は工場検査値であり、今回の試験に用いた計測器よりも精度は低い。そこで、評価に当たっては1000時間以降の測定値を用いることとした。3回の測定結果から管壁厚さについては大きく変わっていないことがわかる。その差についてTable3.6、3.7に1000時間から2000時間と2000時間から3000時間までの厚さ変化(減肉)としてそれぞれ示す。1000時間毎の減肉量はパイプ、レデューサ、エルボと異なる部位においても大きな違いはなく10 μ m以下となっている。特に直線部での変化は2回とも約3、2 μ mで非常に小さな値である。

Table3.8に本実験の評価結果について示す。また、Fig.3.2に運転時間とエロージョン量の関係を示す。図より、エロージョン量が時間に比例するとして近似すると、今回の測定結果は+10%、-1%の範囲内であり、この結果より5000時間(1年間の運転時間)における減肉量を評価すると約12 μ m、30年使用した場合には約370 μ mの減肉が予測される。また、クーポンについてみるとクーポン部では厚さはほとんど変化していない。クーポン部分の流速条件(0.3m/s)では超音波厚さ計やマイクロメーターの分解能が1 μ mであることからエロージョンによる減肉はほぼゼロであると考えられる。

ところで、実機の設計では、150A-Sch80又は200A-Sch80の配管を用いることとしており、それぞれ配管肉厚は11.0、12.7mmである。今回の評価結果は+10%を見込んで0.5%にも満たない値である。水銀循環システムの配管には最高で1.0MPaの内圧がかかる設計であるため、内圧に対して十分な裕度を持つ必要がある。SUS316Lの許容応力は115MPaであり、エロージョンのない場合には、内圧が1.0MPaの場合の配管の応力はそれぞれ13.7MPa、15.5MPaであり、1mm減肉した場合において15.1、16.8MPaとなる。この結果から、実機での水銀循環システムにおける配管では、30年間使用してもエロージョンによる配管の減肉は微小であり、エロージョンを原因とした強度低下はないと考えられる。

今回は同一流速での結果であるが、エロージョンは流速に大きく影響されるため、水銀ターゲット内では配管内に比べ流速が高くなることから、水銀ターゲット容器ビーム窓部近傍で想定される最大水銀流速1.5m/sまで流速を増加させた場合のエロージョン量の変化を測定する計画であ

る。

3.2 水銀付着量測定結果

水銀ターゲット交換時等の水銀ドレン時に問題となるターゲット容器や配管への水銀の付着量について、超音波洗浄槽でエロージョン試験配管部より取り除いた水銀を採取し、化学天秤を用いてその重量を測定し、評価した結果について述べる。

Table 3.9 に1000, 2000, 3000時間のエロージョン試験後に測定した付着水銀量を示す。3回の測定結果から、運転時間に対して水銀の付着量が増加する傾向は見いだせない。3回測定した平均値から評価すると、付着していた水銀は重さ1.475gで、常温での水銀密度13,530kg/m³を用いて体積に換算すると0.11ccとなる。また、エロージョン試験配管部の内面積は7.73×10⁻²m²であるため単位面積あたりの付着水銀量は19.1g/m²と極めて小さく、平均付着厚さを計算すると1.4μmとなる。このことから、150A-Sch80の配管1mにおける残留水銀量を評価すると8.59gの水銀が配管に付着残留し、200A-Sch80の配管では11.45gが付着残留することになる。また、Fig.3.3に示す現設計における水銀ターゲット容器の場合には内表面積が2.1m²であり、約40g(約3cc)が残留することが想定される。水銀の運転停止後の残留放射能4.0×10¹¹ Bq/ccは運転中の放射能1.4×10¹² Bq/ccに比べて低く⁽⁵⁾、3cc程度の水銀が残留しても水銀の残留放射能は1.2×10¹² Bqであり、ターゲット容器の放射化量1.0×10¹⁵ Bqと比べてはるかに小さい。(運転停止後の水銀によるガンマ線強度は、200A-Sch80の配管に残留した水銀が配管内面に一様に付着したとすると、一様に5μm付着した場合、管表面で2mSv/hr程度と評価されている⁽⁶⁾ことから推量して0.56mSv/hrとなる。) ターゲットシステムのメンテナンスはほとんどリモートで行う計画であるが、緊急の場合に人間がアクセスする可能性があり、残留水銀による線量の評価が必要となる。そこで、残留水銀量評価についても、今後さらに繰り返し測定を行うことによってより精度の高いデータを取得して行く予定である。

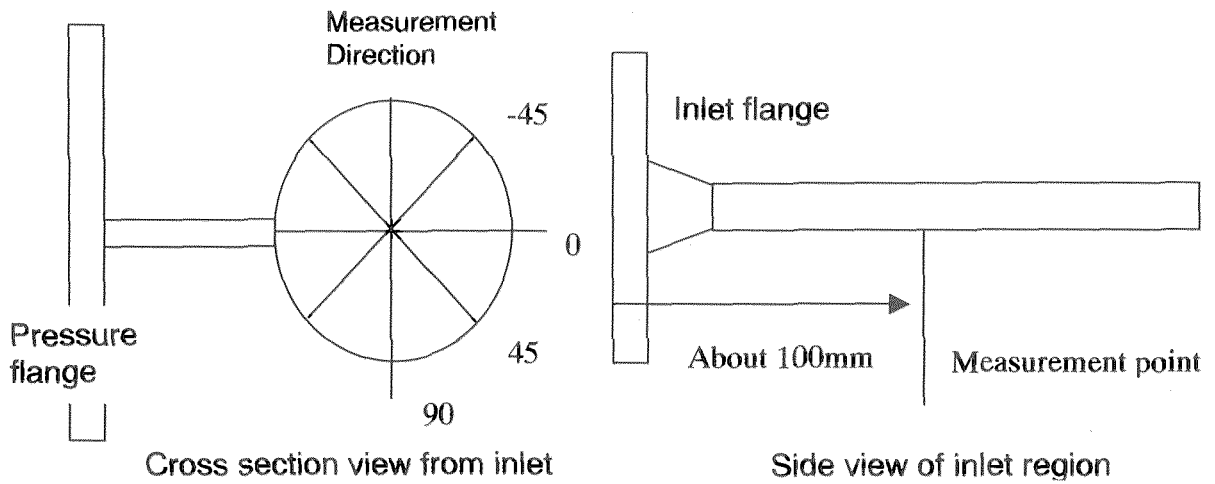


Fig3.1 Measurement Point of Preliminary Test with Straight Pipe

Table3.1 Measurement Results of Preliminary Test

Degree	I.D. [mm]	0hour		668hour		Defference	
		Before	Later	I.D.	Thickness		
-45		14.28	14.29	0.01	0.005		
0		14.30	14.31	0.01	0.005		
45		14.31	14.32	0.01	0.005		
90		14.33	14.33	0	0		
Average				0.0075	0.00375		

Table 3.2 Thickness Measurement Results before Test (0 hours)

Degree	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
0	5.21	3.61	5.31	5.40	4.67	3.62	4.62	4.64	3.68	4.83	5.49	5.25	3.75	5.24	5.61	3.75	5.27
90	5.37	-	-	5.58	3.87	-	-	-	-	4.04	5.27	5.46	3.69	5.47	-	-	5.04
180	5.51	3.75	5.48	5.39	4.71	3.75	4.86	4.85	3.69	4.51	5.12	5.64	3.58	5.57	5.48	3.63	5.04
270	5.43	3.61	5.59	5.25	4.79	3.72	3.84	4.10	3.76	4.84	5.32	5.47	3.67	5.48	5.35	3.64	5.32

Unit: mm

Test Piece

	Micrometer	Super-Sonic
R	1.89	1.91
S	1.89	1.91
T	1.89	1.90
U	1.89	1.91

Unit: mm

Precious Time
0 h 0 m

Table 3.3 Thickness Measurement Results after 1000 hours

Pipe wall Degree	Thickness Measurement Results after 1000 hours																		
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q		
0	5.135	3.728	5.475	5.600	4.670	3.726	4.623	4.730	3.665	4.676	5.382	5.644	3.627	5.460	5.410	3.594	5.270		
90	5.340	-	-	5.340	3.867	-	-	-	-	3.932	5.361	5.449	3.714	5.429	-	-	5.073		
180	5.445	3.579	5.282	5.342	4.689	3.579	4.559	4.553	3.664	4.765	5.187	5.226	3.674	5.211	5.304	3.724	5.070		
270	5.330	3.691	5.199	5.486	4.807	3.701	3.808	3.997	3.739	4.750	5.170	5.487	3.576	5.434	5.349	3.699	5.283		

Unit: mm

Test Piece	Thickness Measurement Results after 1000 hours	
	Micrometer	Super-Sonic
R	1.888	1.888
S	1.886	1.886
T	1.887	1.887
U	1.892	1.892

Unit: mm

Precious Time
1000 h 30 m

Table 3.4 Thickness Measurement Results after 2000 hours

Pipe wall Degree	Pipe wall																
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
0	5.130	3.725	5.464	5.591	4.659	3.725	4.619	4.723	3.660	4.664	5.377	5.639	3.623	5.458	5.407	3.590	5.267
90	5.338	3.623	5.511	5.326	3.863	3.639	4.780	4.629	3.555	3.923	5.358	5.452	3.714	5.419	5.309	3.617	5.072
180	5.440	3.576	5.275	5.333	4.679	3.577	4.552	4.551	3.661	4.757	5.175	5.221	3.671	5.213	5.300	3.722	5.062
270	5.329	3.690	5.186	5.481	4.796	3.696	3.801	3.992	3.736	4.746	5.163	5.480	3.572	5.428	5.346	3.698	5.276

Unit: mm

Test Piece	Test Piece	
	Micrometer	Super-Sonic
R	1.888	1.888
S	1.886	1.886
T	1.887	1.887
U	1.892	1.892

Unit: mm

Precious Time
2037 h 8m

Table 3.5 Thickness Measurement Results after 3000 hours

Pipe wall Degree	Thickness Measurement Results after 3000 hours																		
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q		
0	5.127	3.726	5.461	5.591	4.655	3.724	4.619	4.719	3.651	4.662	5.378	5.635	3.621	5.457	5.403	3.583	5.263		
90	5.335	3.625	5.509	5.325	3.857	3.634	4.778	4.619	3.551	3.923	5.354	5.449	3.713	5.417	5.303	3.616	5.070		
180	5.440	3.574	5.275	5.321	4.677	3.574	4.549	4.548	3.659	4.756	5.171	5.220	3.671	5.210	5.299	3.721	5.057		
270	5.329	3.687	5.185	5.481	4.796	3.692	3.799	3.991	3.735	4.743	5.159	5.480	3.571	5.425	5.345	3.695	5.271		

Unit: mm

Test Piece

Test Piece	Micrometer	Super-Sonic
R	1.888	1.888
S	1.886	1.886
T	1.887	2.022
U	1.892	1.892

Unit: mm

Precious Time
3109 h 4m

Table 3.6 Thickness difference between 1000 to 2000 hours

Pipe wall		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
Degree	0	0.005	0.003	0.010	0.009	0.011	0.002	0.004	0.007	0.005	0.012	0.004	0.005	0.004	0.003	0.003	0.004	0.004
	90	0.003	-	-	0.014	0.005	-	-	-	-	0.008	0.003	-0.003	0.001	0.010	-	-	0.001
	180	0.004	0.003	0.007	0.010	0.010	0.002	0.008	0.002	0.003	0.007	0.012	0.005	0.003	-0.002	0.004	0.002	0.007
	270	0.001	0.001	0.013	0.005	0.011	0.005	0.007	0.004	0.003	0.004	0.007	0.007	0.004	0.005	0.003	0.002	0.008
Av.		0.0031	0.0024	0.0103	0.0095	0.0091	0.0029	0.006	0.0044	0.0034	0.0079	0.0067	0.0035	0.0031	0.0038	0.0033	0.0023	0.0049

Unit; mm

TestPiece

	Micrometer	Super-Sonic
R	0	0.000
S	0	0.000
T	0	0.000
U	0	0.000
Av.	0	8.3E-05

Unit; mm

Pipe	Reducer	Elbow	Total
0.0028	0.0056	0.0069	0.0051

Outside	0.0060
Inside	0.0077
Side	0.0075

Precious Time	Total Time
1036 h 38m	2037 h 8m

Table 3.7 Thickness difference between 2000 to 3000 hours

Pipe wall		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
Degree		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
0	0.003	0.000	0.004	0.000	0.004	0.001	0.000	0.004	0.010	0.002	0.000	0.004	0.004	0.002	0.001	0.004	0.007	0.003
90	0.003	-0.002	0.002	0.002	0.005	0.005	0.002	0.009	0.005	0.000	0.004	0.003	0.003	0.000	0.002	0.006	0.001	0.002
180	0	0.002	0.000	0.012	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002	0.001	0.004	0.001	0.001	0.001	0.003	0.001	0.001	0.005
270	0	0.003	0.001	0.000	0.000	0.004	0.004	0.001	0.001	0.003	0.004	0.000	0.000	0.001	0.004	0.001	0.003	0.005
Av.	0.0015	0.0007	0.0015	0.0033	0.0029	0.0032	0.0020	0.0042	0.0043	0.0014	0.0030	0.0022	0.0008	0.0023	0.0029	0.0031	0.0039	

Unit: mm

TestPiece

	Micrometer	Super-Sonic
R	0	0.000
S	0	0.001
T	0	0.001
U	-0.001	0.001
Av.	0	6.7E-04

Unit: mm

Pipe	Reducer	Elbow	Total
0.0024	0.0026	0.0026	0.0025

Outside	0.0023
Inside	0.0013
Side	0.0024

Precious Time	Total Time
1071 h 56m	3109 h 4m

Table 3.8 Erosion Estimation for Experimental Facility

	Precious Time	Erosion Thickness	1year	30years
		[μ m]	[μ m]	[μ m]
1	1036 hr 36 min	2.8	13.51	405.2
2	1071 hr 56 min	2.4	11.19	335.84
Av.			12.35	370.5

150A-Sch80	11.0mm
200A-Sch80	12.7mm

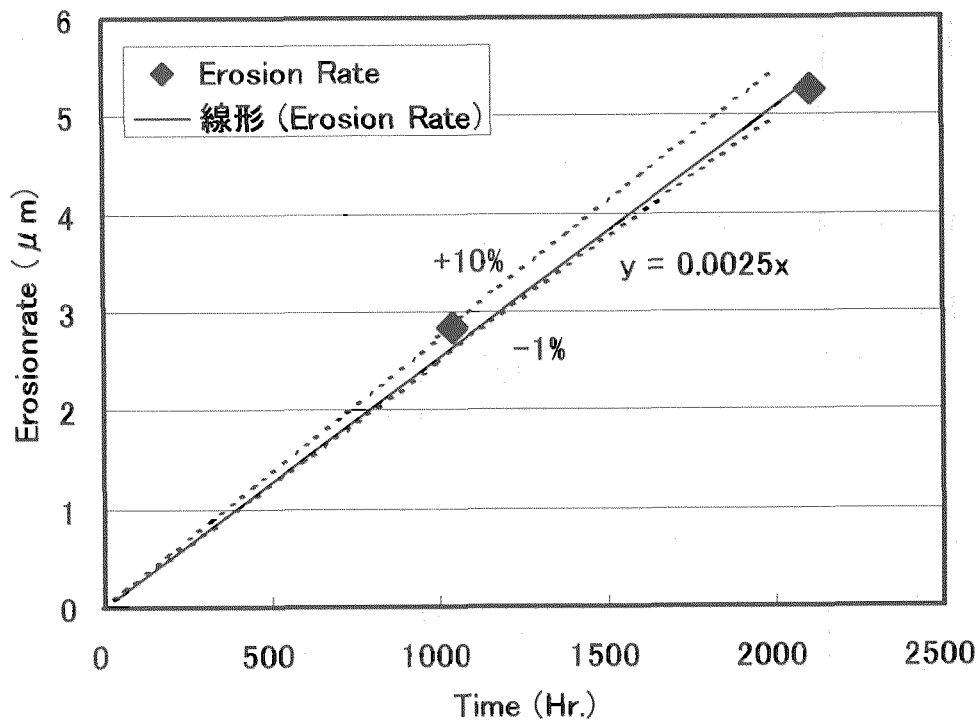


Fig. 3.2 Erosion Rate vs. Experimental Time

Table 3.9 Amount of Mercury attached on Piping after Drainage

Test Section Inner Surface	0.0773 m ²			
Mercury Density	13.53 g/cc			
	1st	2nd	3rd	Av.
Attached Mercury [g]	1.4866	1.2168	1.7216	1.4750
Volume [cc]	0.1099	0.0899	0.1272	0.1090
Av. Thickness [m]	1.42E-06	1.16E-06	1.65E-06	1.41E-06
Amount / 1m ² [cc]				
[g]	1.422	1.164	1.646	1.410
	19.24	15.74	22.28	19.09
150A-Sch80	Inner Dia. 143.2 mm			
	Perimeter 449.9 mm			
Amount / 1m [g]	8.654	7.083	10.022	8.586

4. 結 言

水銀流動基礎実験装置において、曲がり部等を含んだエロージョン試験配管を用いて連続運転を行い、配管のエロージョン量評価のための実験を実施した。試験は約 1000 時間毎に配管の肉厚を超音波厚さ計で計測し、その差をもってエロージョンによる配管管壁厚さの減肉量評価を行った。また、配管測定時に付着した水銀を超音波洗浄槽で取り除き、その残留水銀量についての評価を行った。今回の実験結果より以下の知見を得た。

1. 実機設計条件である低流速条件 (0.7m/s 以下) では、1000 時間で約 $3\mu\text{m}$ の減肉であった。配管の肉厚変化は現在の中性子散乱施設の運転計画と照らし合わせると、30 年でも 0.5mm 以下となるという評価結果が得られた。減肉が 0.5mm ということは、内圧 1.0MPa に対する応力値は許容応力の 1/6 以下であり、エロージョンがシステムの健全性に影響を与える可能性は極めて少ないと考えられる。
2. ドレン時の水銀配管への残留水銀量評価では、150A-sch80 配管 1m あたり 8.5g 程度、水銀ターゲット容器の場合には 40g が残留することが想定される。この量は、現在の評価における水銀システムのあるホットセル内で 30 分のメンテナンスが可能な残留水銀量に対して約 3 倍の余裕があることになり、システムメンテナンス時やターゲット保管時の放射線量等については問題のない値である。

超音波厚さ計の分解能を考慮しても有意なエロージョン量として評価するために現在も試験を継続中である。また、エロージョンは配管と水銀の摩擦により起こり、水銀の流速による影響が強いと考えられる。そこで、流速が 1.5m/s の場合についてもデータを蓄積して行く予定である。また、クーポンについては断面の顕微鏡観察によって腐食などの影響も調べる予定である。

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) 日本原子力研究所・高エネルギー加速器研究機構共同推進チーム, “大強度陽子加速器計画”, JAERI-Tech 2000-003, (2000-2).
- (2) 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
- (3) 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
- (4) 粉川広行、二川正敏、石倉修一、日野竜太郎, “核破砕中性子散乱施設用ターゲット容器材料の水銀腐食に関する研究” 2000年機械学会茨城講演会講演論文集, p85, 9月22日, 茨城大学, 日立, 2000
- (5) 小林薫、神永政紀、羽賀勝洋、木下秀孝、麻生智一、粉川広行、日野竜太郎, “水銀ターゲットシステムにおけるソースタームの予備的評価”, JAERI-Tech 2000-050, (2000-8)
- (6) H.Hayashi, H. Nakano, Y. Ogawa, K. Kobayashi, T. Kai, M. Kaminaga and R. Hino, “Gamma-ray Dose Rate on the Target Trolley at Maintenance Period. “ The 2nd Int. Workshop on Mercury Target and Cold Moderator Engineering, November 13-15, JAERI-Tokai, 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

$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$
 $1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$

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

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	$\text{m} \cdot \text{kg} / \text{s}^2$
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	$\text{N} \cdot \text{m}$
工率, 放射束	ワット	W	J / s
電気量, 電荷	クーロン	C	$\text{A} \cdot \text{s}$
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	S	A / V
磁束	ウェーバ	Wb	$\text{V} \cdot \text{s}$
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	$^{\circ}\text{C}$	
光度	ルーメン	lm	$\text{cd} \cdot \text{sr}$
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
線量等量	シーベルト	Sv	J / kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バル	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$
 $1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$
 $1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$
 $1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm} / \text{s}^2 = 10^{-2} \text{ m} / \text{s}^2$
 $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$
 $1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C} / \text{kg}$
 $1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$
 $1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$

(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ない。

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

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

圧	MPa(=10bar)	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	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{18}
	9.80665	1	2.72407×10^{-6}	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{19}
	3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^5	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{25}
	4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{19}
	1055.06	107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{21}
	1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{18}
	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

$1 \text{ cal} = 4.18605 \text{ J (計量法)}$
 $= 4.184 \text{ J (熱化学)}$
 $= 4.1855 \text{ J (15}^{\circ}\text{C)}$
 $= 4.1868 \text{ J (国際蒸気表)}$
 仕事率 1 PS(仏馬力)
 $= 75 \text{ kgf} \cdot \text{m} / \text{s}$
 $= 735.499 \text{ W}$

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4報) 水銀流動によるエロージョン量の測定