

JAERI-M
91-207

高温ガス炉の事故時の
核分裂生成物離脱割合評価

1991年12月

沢 和弘・伊藤 治彦・松本実喜夫・遠藤 泰一
塩沢 周策・市橋 芳徳

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1991

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 日立高速印刷株式会社

高温ガス炉の事故時の核分裂生成物離脱割合評価

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉開発部

沢 和弘・伊藤 治彦⁺・松本実喜夫⁺

遠藤 泰一⁺・塩沢 周策・市橋 芳徳⁺⁺

(1991年11月12日受理)

高温ガス炉の減圧事故時における沈着核分裂生成物(FP)の離脱割合の評価方法を検討するために、離脱実験を行った。

実験の特徴は以下のとおりである。

- ① 大口径破断を想定した場合にも実験結果を適用できるように、実験範囲を高いガス流速まで広げた。
- ② 高温ガス炉の1次系の状態を模擬したOGL-1を用いて、実際にFPを沈着させて試料を作成した。
- ③ 離脱機構を総合的に検討するため、ガス流速の上昇による離脱実験(ブローダウン試験)に加えて、拭取り試験、温水洗浄及び化学リーチング試験も実施した。

本報は、実験に基づき、高温ガス炉の事故時のFP離脱割合の評価方法を検討したもので、高温工学試験研究炉の安全評価における離脱割合評価方法も併せて示した。

Evaluation of Lift-off Fraction in Accident
Condition of HTGR

Kazuhiro SAWA, Haruhiko ITO⁺, Mikio MATSUMOTO⁺
Yasuichi ENDO⁺, Shusaku SHIOZAWA and Yoshinori ICHIHASHI⁺⁺

Department of HTTR Project
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received November 12, 1991)

In order to examine the lift-off fraction of fission products plated-out in primary cooling system during the depressurization accident of the High Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR), lift-off experiment was carried out.

The features of the experiment are as follows.

- ① In blow down tests, range of gas velocity was extended so that the test results can be applied to large scale depressurization accident.
- ② Fission products were plated-out on test specimen in the OGL-1 in which the plate-out condition is similar to that of the HTGR.
- ③ In addition to the blow down tests, wipe-off tests, hot water and chemical leaching tests were also performed to investigate the lift-off mechanism.

This report describes examination results of lift-off fraction of fission products in accident condition of HTGR based on the lift-off experiment. The evaluation model of lift-off fraction in the safety analysis of the HTTR is also shown in this report.

Keywords: Lift-off, Fission Products, Depressurization Accident, HTGR,
Blow Down Test, OGL-1, Wipe-off, Water and Chemical Leaching

+ Department of JMTR Project

++ Department of Hot Laboratories, Tokai Research Establishment

目 次

1. まえがき	1
2. 離脱割合評価方法	2
2.1 離脱機構	2
2.2 評価の考え方	3
3. 実験	5
3.1 概要	5
3.2 方法	5
3.3 結果	6
4. 考察	16
4.1 ブローダウン試験	16
4.2 拭取り試験, 温水洗浄及び化学リーチング試験	16
4.3 ダスト離脱試験結果との比較	17
4.4 H T T R の安全評価における離脱割合評価モデル	17
5. まとめ	22
謝 辞	22
参考文献	23
付録1 ブローダウン試験片部流速の算出方法	24
付録2 ブローダウン試験装置の流量特性測定試験例	27
付録3 回帰直線の計算	33

Contents

1. Introduction	1
2. Evaluation Method of Lift-off Fraction	2
2.1 Mechanisms	2
2.2 Evaluation Method	3
3. Experiment	5
3.1 Outline	5
3.2 Procedure	5
3.3 Results	6
4. Discussion	16
4.1 Blow-down Test	16
4.2 Wipe-off, Hot Water and Chemical Leaching Tests	16
4.3 Comparison with Dust Lift-off Experiment	17
4.4 Lift-off Model in the Safety Analysis of The HTTR	17
5. Conclusion	22
Acknowledgement	22
References	23
Appendix 1 Calculation Method of Blow-down Velocity on the Specimen	24
Appendix 2 Examples of Characteristics of Blow-down Test Apparatus	27
Appendix 3 Calculation Method of Regression Line	33

1. まえがき

高温ガス炉では、通常運転時に主に被覆燃料粒子の被覆層が破損した燃料から放出された沈着性の核分裂生成物（Fission Product;以下「FP」という。）が、1次冷却設備の機器・配管表面に沈着する。これらのFPは、通常運転時における遮蔽設計の放射線線源を定める上で重要であり、これまでOGL-1を用いた沈着分布の測定⁽¹⁾及び計算コードの開発が行われ^{(2)、(3)}、そこで得られた多くの知見は、例えば高温工学試験研究炉（High Temperature Engineering Test Reactor ;以下「HTTR」という。）の設計に反映されている。一方、高温ガス炉の原子炉冷却材圧力バウンダリの健全性が損なわれる事故、例えばHTTRの1次冷却設備二重管破断事故（減圧事故）時には、これらの沈着FPが破断に伴う流速の上昇等によって剝離し、1次冷却設備から放出される可能性がある。この時、被ばく評価の観点からは、沈着性FPのうち甲状腺に対する影響の大きいヨウ素、スカイシャイン等によって外部被ばくに大きな影響を及ぼすセシウムが評価上重要な核種となる。1次冷却設備内に沈着しているFPの剝離による離脱（リフトオフ）割合の研究は、これまで海外を中心に行われてきており、米国のFort St. Vrain炉の安全審査においては、実験結果に基づきFPの離脱割合はせん断力比によって記述できるとされている⁽⁴⁾。

これらの実験結果を参考にし、原研においても高温ガス炉の事故状態を模擬した離脱実験を行った。実験を行うに当たっては、以下に示す点に重点をおいた。

- ①これまでの実験は、主に小口径破断を想定したものであるため、大口径破断を想定した場合にはその結果を外挿することができるかどうかの判断ができなかった。そこで、せん断力比の大きい（流速が早い）ところまで実験範囲を広げる。
- ②試料としては、高温ガス炉の1次系の状態を模擬したOGL-1で実際にFPを沈着させて作成する。
- ③ガス流速の上昇による離脱実験（ブローダウン試験）に加えて、拭取り試験、温水洗浄及び化学リーチング試験を行い、離脱機構等を総合的に検討できるようにする。

本報は、原研で行った実験に基づき、高温ガス炉の事故時のFP離脱割合の評価方法を検討したもので、2章では離脱割合評価の基本的考え方を、3章では原研で行った実験の方法及び結果を示す。また、4章ではこれらの実験結果に基づき考察を加えるとともに、HTTRの安全解析における離脱割合評価モデルについて述べる。

2. 離脱割合評価方法

2.1 離脱機構

これまでの沈着に関する研究から、高温ガス炉の1次冷却系内壁面に沈着したF Pの形態は、大別して以下の3種類に分類できると考えられる^{(2)、(4)、(5)、(6)}。

- (1) 内壁面に付着したダストに吸着しているF P
- (2) 内壁表面に吸着しているF P
- (3) 内壁面からさらに母材中に拡散、侵入しているF P

これらの分類を図示したものをFig. 2.1に示す。

1次冷却系に存在するF Pの付着したダストは、主に高温ガス炉の炉内構成要素として存在する黒鉛から発生すると考えられる。1次冷却材中に単体として放出されるF Pが1次冷却系内壁面に存在する炭素または黒鉛に集中的に吸着するとは考え難いため、この形態で1次冷却系内に存在するF Pは、運転中に炉心内で燃料要素の黒鉛表面近傍に吸着したもので、そのまま機械的な力で剥離した黒鉛とともに、1次冷却系内を移動したものが主であると考えられる。従って、このような形で存在し得るF Pは、通常運転状態における温度状態で炉内黒鉛への吸着力が大きいもので、かつ、1次冷却系内面を構成する金属へ移行しにくい核種であると考えられる。こうした観点からは、よう素等、高温ガス炉の通常運転状態において黒鉛に吸着しにくい核種は、この形態で1次冷却系内に存在することはほとんど無いと考えられる。また、発生機構から考えて、被ばく評価上問題となりうるような量の黒鉛ダストが発生し得るのは、炉心内でF Pを含む可能性がある燃料要素表面が機械的に直接接触、摩耗する、ペブルベッド型炉心の場合である⁽⁵⁾。HTTRのように燃料要素同志が直接接触することの無いブロック型燃料の場合には、F Pを含んだ大量のダストの発生はないと予想され、OGL-1におけるこれまでの実験でも大量のダストが発生したことはない。しかしながら、減圧事故状態におけるダストの挙動を一般的に調べるため、ダストの離脱に関する試験も別途行った⁽⁷⁾。

燃料体から放出されたF Pはその後1次冷却材と共に1次冷却系を移動し、その間に内表面に沈着する。壁面温度が高く、かつ、吸着したF Pがある程度長い時間表面に留まると、F Pは1次冷却設備の機器・配管表面から母材内面に拡散侵入する。高温ガス炉の1次冷却系配管の上流側は、運転中最高950°Cの高温状態にあるため、場所によってはこのような母材内侵入F P量が無視できない。これらの母材内侵入F Pは、減圧事故が生じた場合でも、壁面温度が極端に上昇することにより昇華するか、または、機械的に母材が削られるようなことがない限り、流速の変化程度では離脱しないと考えられる。

減圧事故が生じた場合に生じるF Pの離脱は、以下の2つの機構によって生じると考えられる。

(a) 物理的要因による離脱

沈着 F P が、流速等の急激な増大に伴い離脱する機構。(1) については、ダストそのものがせん断力の変化によって離脱すると考えられる。(2) については、流速が極端に大きい場合は壁表面の微細構造（酸化皮膜等）の一部が剥離することによって離脱する可能性があると考えられる。(3) については、通常予想される減圧事故の範囲では離脱しないと考えられる。

(b) 化学的要因による離脱

沈着 F P が、温度の上昇、冷却材中の F P 濃度等の変化に伴い離脱する機構。(1) については、ダストからの、(2) については、1 次冷却系内壁表面からの脱着が考えられる。(3) については、昇華による脱着が考えられるが、その機構から(1)及び(2)に比べてほとんど無視できると考えられる。

高温ガス炉の通常運転状態等の、流速等の変化が緩慢な場合は、(b) の機構による F P の離脱が主であるが、大口徑配管破断事故のように、流速等の変化が急激な場合は、(a) の機構による離脱が支配的となると考えられる。

2.2 評価の考え方

これまで海外において行われた離脱に関する実験は、2.1節の(b)の機構を仮定して行われており、これらの実験データに基づき、せん断力比（Shear RatioまたはShear Force Ratio）の関数として離脱割合（Lift-off Fraction）を定めている。⁽⁴⁾ 離脱割合は、事故を模擬した流速上昇により除去される F P 量を流速上昇前の沈着量で除したものと定義している。せん断力比は、流速上昇前（通常運転時に相当）に F P が沈着している 1 次冷却系内壁面に作用しているせん断力と、流速が上昇した時（配管破断事故時に相当）の最大せん断力の比として定義している。

$$\tau = \frac{\Delta P \cdot D}{4 L} \quad (1)$$

ここで、 τ : 壁面せん断力 (N/m²)、
 ΔP : ある区間の圧力差 (N/m²)、
 D : 流路の等価直径 (m)、
 L : ある区間の長さ (m) である。

従って、せん断力比 S R は、以下の式で定義される。

$$S R = \frac{\tau_a}{\tau_n} \quad (2)$$

ここで、 τ_a : 事故状態における壁面せん断力 (N/m²)、
 τ_n : 通常運転状態における壁面せん断力 (N/m²) である。

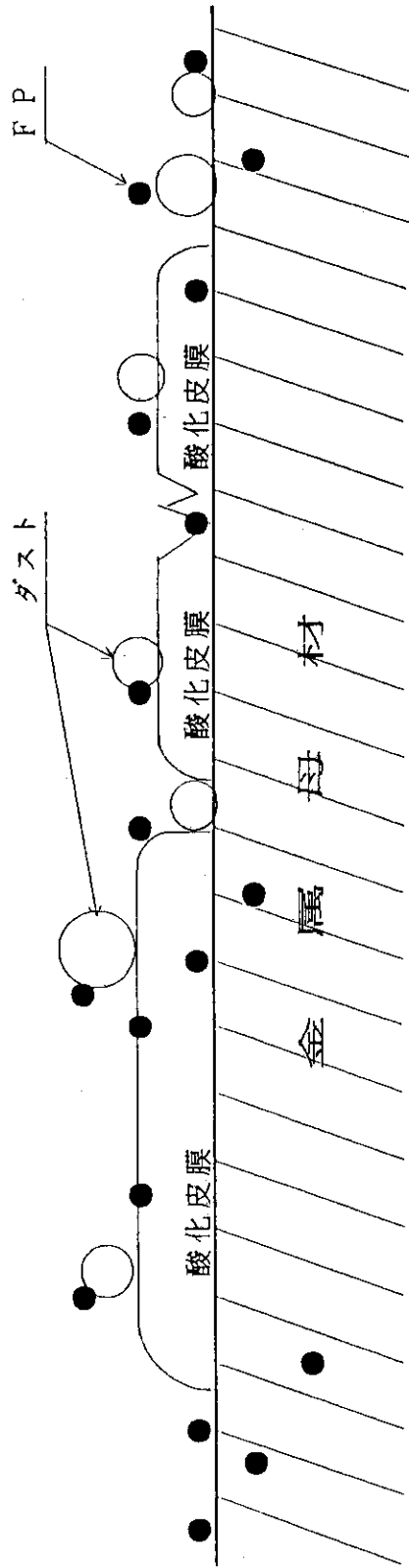


Fig. 2.1 Fission products plate-out model

3. 実 験

3.1 概要

これまで開発してきたF P沈着分布計算コード⁽²⁾を用いてHTTRの1次冷却設備の沈着分布を計算すると、運転中に多くのF Pが沈着する部位は、ヘリウムガス中のF P濃度が高く、配管温度が低い1次加圧水冷却器伝熱管部及び表面積が大きいガス循環機部分等である⁽⁶⁾。また、OGL-1における沈着分布測定結果においても、同様な条件の再生熱交換器伝熱管にF Pが最も沈着しやすいという結果が得られている。2章で述べたように、本実験においては、F Pの離脱割合を主に流速の変化によって生じるせん断力の変化で記述しようとしている。そのため、実験に用いる試験片は、可能な限りHTTRにおけるこれらの部位のF P沈着条件とできるだけ近い状態で沈着したものをを用いることとした。すなわち、離脱実験用の試験片は、OGL-1に設置してF Pを沈着させることにより作成した。せん断力比は、試験片の沈着時と事故時の流速等の比から求める。離脱割合は、試験前後の沈着量をガンマ線測定しその比から求める。測定の対象とした核種は、被ばく評価上重要なセシウム、よう素等である。離脱割合に影響を与えらる流速等の実験上のパラメータについては、Table 3.1 に示すように、HTTRの1次冷却設備二重管破断事故等の条件を模擬するか、あるいは保守的になるように定めている。

拭取り試験は、離脱試験を行った後、試料表面に残存する核分裂生成物を除去する目的で行った。

温水洗浄及び化学リーチング試験は、ブローダウン試験を終了した試験片等を用いて、ブローダウン試験で離脱しなかったF Pの除去を目的に行った。温水洗浄は、配管表面に吸着したダスト中のF P及び酸化皮膜表面に吸着したF Pを除去するために、また、化学リーチングは、酸化皮膜内に拡散侵入したF Pを除去するためにに行った。

3.2 方法

3.2.1 ブローダウン試験⁽⁹⁾

ブローダウン試験は、F P離脱実験装置を用いて行った。実験装置のフローシート及び配置図をFig. 3.1及び 3.2にそれぞれ示す⁽¹⁰⁾。

実験装置に装着する試験片は、OGL-1燃料集合体のハンガーロッド部に取り付けたF P試験体内の沈着管から作成した。OGL-1燃料集合体の一部となるF P試験体は炉中心から1.5～2mに位置し、燃料集合体から放出されたF Pはヘリウムガス流路に沿って移行し、F P試験体内の沈着管内面に沈着する。F P試験体は第9次、第10次及び第12次OGL-1燃料体照射試験時に装荷された。ブローダウン試験片は、F P試験体を100 mm長さに切断して作成した。ブローダウン試験片の材質はステンレス鋼、ハステロイ-X及びインコネルである。沈着時の流速は約40～50 m/s、試験時の流速は約90～580 m/sである。

離脱割合は、ブローダウン試験前後に試験片に沈着している放射性核種から出るガンマ線をGe検出器で測定し、スペクトルから核種を同定した。測定した核種はI-131、Cs-137、Cs-134、Mn-

54、Co-60 であるが、本報では、放射化生成物であるMn-54及びCo-60については割愛した。また、I-131 は半減期が約8日と短いため、第12次OGL-1燃料体照射試験後すぐにFP試験体を取り出し、試験片を作成し、ブローダウン試験を行った。

本試験における試験片部流速の算出方法を付録-1に、特性試験例を付録-2に示す。

3.2.2 拭取り試験⁽⁹⁾

ブローダウン試験では、装置上の制限からせん断力の上限值は約 $15,000 \text{ dyn/cm}^2$ (せん断力比にして約135)である。そこで、2章に述べたように離脱割合の上限值を検討するために、試験片内面を布で拭き取る、いわゆる拭き取り試験を行い、高せん断力を得ることとした。

拭き取り試験装置をFig. 3.3に示す。本試験は、図に示すように二つ割りにした試験片内面に接触させた滑り片(ウェイト)をロードセルに接続し、試験片ケースを移動させるものである。試験ケースはモーターによって定速移動させ、移動時の力をロードセルで検出しせん断力を求める。本試験によって得られた最大せん断力は約 $370,000 \text{ dyn/cm}^2$ (せん断力比にして約3,000)である。

3.2.3 温水洗浄及び化学リーチング試験⁽⁹⁾

温水洗浄は、約 80°C の純水中に試験片を90分程度入れ、試験片表面に付着しているダスト中のFP及び試験片表面に付着しているFPを除去するものである。この試験によるFPの除去割合は、洗浄前後の試験片のガンマ線測定から評価する。手順をFig. 3.4に示す。

化学リーチングは、約 80°C のリーチング溶液中に試験片を約20分入れ、試験片の酸化皮膜をその中のFPとともに除去するものである。リーチング溶液は、水1リットルに対し、NaOHを102g、 KMnO_4 を34gの割合で調合したものである。除去割合は、温水洗浄後と化学リーチング後のガンマ線測定により評価する。手順をFig. 3.5に示す。

3.3 結果

ブローダウン試験結果をI-131についてTable 3.2に、Cs-137についてTable 3.3に、Cs-134についてTable 3.4にそれぞれ示す。

拭き取り試験結果をCs-137についてTable 3.5に、Cs-134についてTable 3.6にそれぞれ示す。

温水洗浄及び化学リーチング試験結果をCs-137についてTable 3.7に、Cs-134についてTable 3.8にそれぞれ示す。

なお、表中の試料名のうち、はじめの2桁の数字がFPを沈着させたときのOGL-1燃料体の次数を示している。次の英文字は試験片の材質を示し、「H」が Hastelloy-XR、「I」がインコイロ、「S」がステンレスを表している。それ以降の英数字は、試料の切り出しに際しての位置を示している。

Table 3.2 Results of blow-down test (I-131)

Sample name	Shear ratio	Lift-off fraction(%)
12HBL3	23.6	8.81
12HBL2	44.7	22.7
12HAL2	52.7	20.8
12HAL1	95.4	29.3
12HAL3	126	37.8
12HCL2	127	28.4
12HCL1	128	2.68
12HBL1	129	10.6

Table 3.1 Comparison between blow-down test and HTTR

パラメータ	実験条件(*1)	備考
使用材料	ステンレス鋼 ハステロイ X R (1/2Cr-1/2Mo鋼) (17104)	HTTRの1次冷却設備構成材料と同じ材質。表面相さは、▽▽程度。材質の違いにより離脱割合に有意な差はないことが確認されている。
配管温度	C s 約 650 °C I 室温 (C s 約 300 °C ~ 650 °C I 約 200 °C)	C s は約 300 °C ~ 700 °C の配管に多く沈着する。I は約 300 °C 以下の配管に多く沈着する。
ヘリウム圧力	約 30 kg/cm ² (約 20 kg/cm ²)	HTTRは約 40 kg/cm ² であるが、圧力変動による沈着への影響は小さい。
沈着時間 沈着密度	約 100 ~ 150 日 約 10 ⁷ Bq/m ² (約 5 日)	HTTRは 20 × 0.6 年及び 10 ⁷ ~ 10 ¹⁰ Bq/m ² (*2)。沈着密度が高い、即ち沈着時間が長いと配管表面から内部に侵入する離脱しない核分裂生成物の割合が多くなる。(*3)
流速	C s 約 30 m/s ~ 60 m/s I 約 10 m/s (約 14 m/s ~ 30 m/s)	HTTRで沈着量の多い1次加圧水冷却器伝熱管及び1次ヘリウム循環機における流速は、約 20 m/s ~ 40 m/s である。
配管温度	室温 (室温)	HTTRでは室温 ~ 400 °C。温度が低くなることによる離脱割合への影響は小さい。
継続時間	約 1 分 (約 1 分)	1次冷却設備二重管破断事故では数秒。その他、せん断力比が大きくなる配管破断事故では 1 分以下。
流速	最大 550 m/s (最大 130 m/s)	1次冷却設備二重管破断事故では約 800 m/s とする。

(*1) () 内は、米国における実験条件。(*4)

(*2) HTTRにおける最大沈着密度 10¹⁰ Bq/m² は、約 10¹⁶ 原子/m² に相当する。一

方、吸着サイトは、母材の格子間定数(約数オングストローム)から定まり、約 10¹⁹ サイト/m² となる。一般に、核分裂生成物が吸着する場合には吸着サイトがある限り、エネルギー的に安定である単層吸着となる。従って、他の条件が同じであれば、離脱割合は沈着密度によらない。

(*3) HTTRにおける内部侵入核分裂生成物の割合は数十%になる。

Table 3.3. Results of blow-down test (Cs-137)

Sample name	Shear ratio	Lift-off fraction(%)
9HBL1	22.4	6.77
9HAL2	52.5	6.29
9HBL2	54.6	9.09
9IBL2	40.2	2.30
9IBL1	55.3	1.53
9IAL2	84.1	3.82
9IAL1	94.4	3.60
10SAL1	6.4	2.47
10SAL2	26.2	3.37
10SBL2	118	6.46
10HAL1	9.4	3.02
10HAL2	79.1	7.09
10HBL2	133	2.52
10HBL1	134	2.93
10IBL1	64.1	0.57
10IAL1	76.7	2.63
10IBL2	126	7.32
10IAL2	129	1.81
12HBL3	23.6	4.11
12HBL2	44.7	5.64
12HAL2	52.7	12.8
12HAL1	95.4	17.2
12HAL3	126	28.1
12HCL2	127	14.0
12HCL1	128	7.76
12HBL1	129	10.5

Table 3.4 Results of blow-down test (Cs-134)

Sample name	Shear ratio	Lift-off fraction(%)
9HBL1	22.4	8.60
9HAL2	52.6	6.51
9HBL2	54.6	10.8
9IBL2	40.2	1.47
9IBL1	55.3	2.21
9IAL2	84.1	6.92
9IAL1	94.4	4.15
10SAL1	6.4	2.29
10SAL2	26.2	4.99
10SBL2	118	5.41
10HAL1	9.4	6.30
10HAL2	79.1	14.0
10HBL2	133	4.75
10HBL1	134	1.19
10IBL1	64.1	3.96
10IAL1	76.7	2.47
10IBL2	126	8.14
10IAL2	129	2.02
12HBL3	23.6	5.80
12HBL2	44.7	9.85
12HAL2	52.7	15.2
12HAL1	95.4	17.8
12HAL3	126	23.5
12HCL2	127	24.0
12HCL1	128	4.62
12HBL1	129	10.9

Table 3.6 Result of wipe-off test (Cs-134)

Sample name	Wall shear stress ($\times 10^3$ dyn/cm ²)	Wipe-off fraction (%)
9IBL2	80.5	8.57
	209	4.05
10SBL2	117	10.6
	194	1.75
10SBL2	7.28	7.74
	21.3	1.79
10IAL1	203	7.10
	hand wipe	3.74
10IBL2	234	5.64
	361	6.39
10IBL2	30.6	2.97
	208	0
10IAL2	227	10.6
	hand wipe	0
10IBL2	11.6	4.46
	1150	4.13

Table 3.5 Result of wipe-off test (Cs-137)

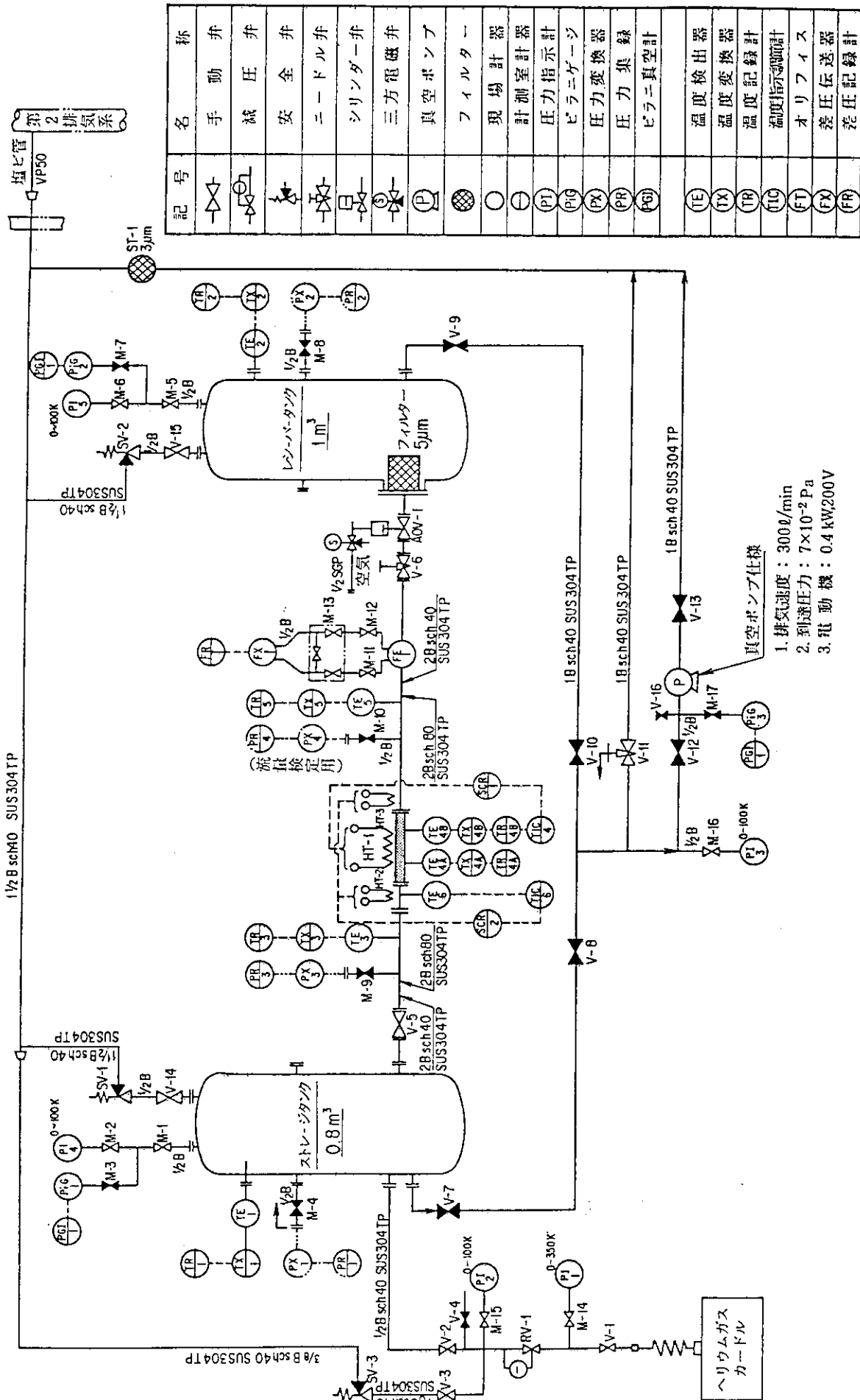
Sample name	Wall shear stress ($\times 10^3$ dyn/cm ²)	Wipe-off fraction (%)
9IBL2	80.5	10.4
	209	1.26
10SBL2	117	8.09
	194	0
10SBL2	7.28	2.65
	21.3	0.91
10IAL1	203	2.47
	hand wipe	1.47
10IBL2	234	1.74
	361	0.23
10IBL2	30.6	1.37
	208	0
10IAL2	227	2.32
	hand wipe	0
10IBL2	11.6	0
	1150	2.19

Table 3.7 Results of hot water and chemical leaching test (Cs-137)

Sample name	Removed fraction (%)	
	Hot water	Chemical leaching
9HBL1	56.1	36.2
9HAL2	63.6	28.4
9HBL2	64.9	25.2
9IBL1	71.1	25.0
9IAL2	72.7	21.4
9IAL1	74.7	20.7
10SAL1	41.4	55.1
10SAL2	43.1	51.4
10HAL1	38.6	57.1
10HAL2	37.8	54.0
10HBL2	22.1	72.7
10HBL1	36.6	57.0
10IBL1	14.8	82.8
9HAY1	74.3	25.6
9HBY1	77.0	23.0
9IAY1	77.1	22.1
10SAY1	55.1	43.7
10SBY1	45.5	53.3
10HAY1	30.7	68.3
10HBY1	43.6	53.9

Table 3.8 Results of hot water and chemical leaching test (Cs-134)

Sample name	Removed fraction (%)	
	Hot water	Chemical leaching
9HBL1	59.0	32.4
9HAL2	66.3	27.1
9HBL2	66.2	23.0
9IBL1	72.7	23.5
9IAL2	71.5	21.1
9IAL1	75.8	19.8
10SAL1	44.3	53.4
10SAL2	45.3	47.3
10HAL1	43.4	50.3
10HAL2	37.3	48.7
10HBL2	20.6	74.6
10HBL1	52.7	46.1
10IBL1	18.2	77.8
9HAY1	78.5	21.5
9HBY1	78.9	21.1
9IAY1	75.9	23.0
10SAY1	56.7	43.3
10SBY1	46.1	52.6
10HAY1	41.0	59.0
10HBY1	50.9	49.1



記号	名称
→	手動弁
↔	減圧弁
⚡	安全弁
⊘	ニードル弁
⊞	シリンダー弁
⊞	三方電磁弁
⊞	真空ポンプ
⊞	フィルター
○	現場計器
⊖	計測計器
PI	圧力指示計
PIG	ピラニゲージ
PX	圧力変換器
PR	圧力集録
PG	ピラニ真空計
TE	温度検出器
TX	温度変換器
TR	温度記録計
TIC	温度指示記録計
FI	オリフィス
FX	差圧伝送器
FR	差圧記録計

Fig. 3.1 Flow diagram of blow-down test apparatus

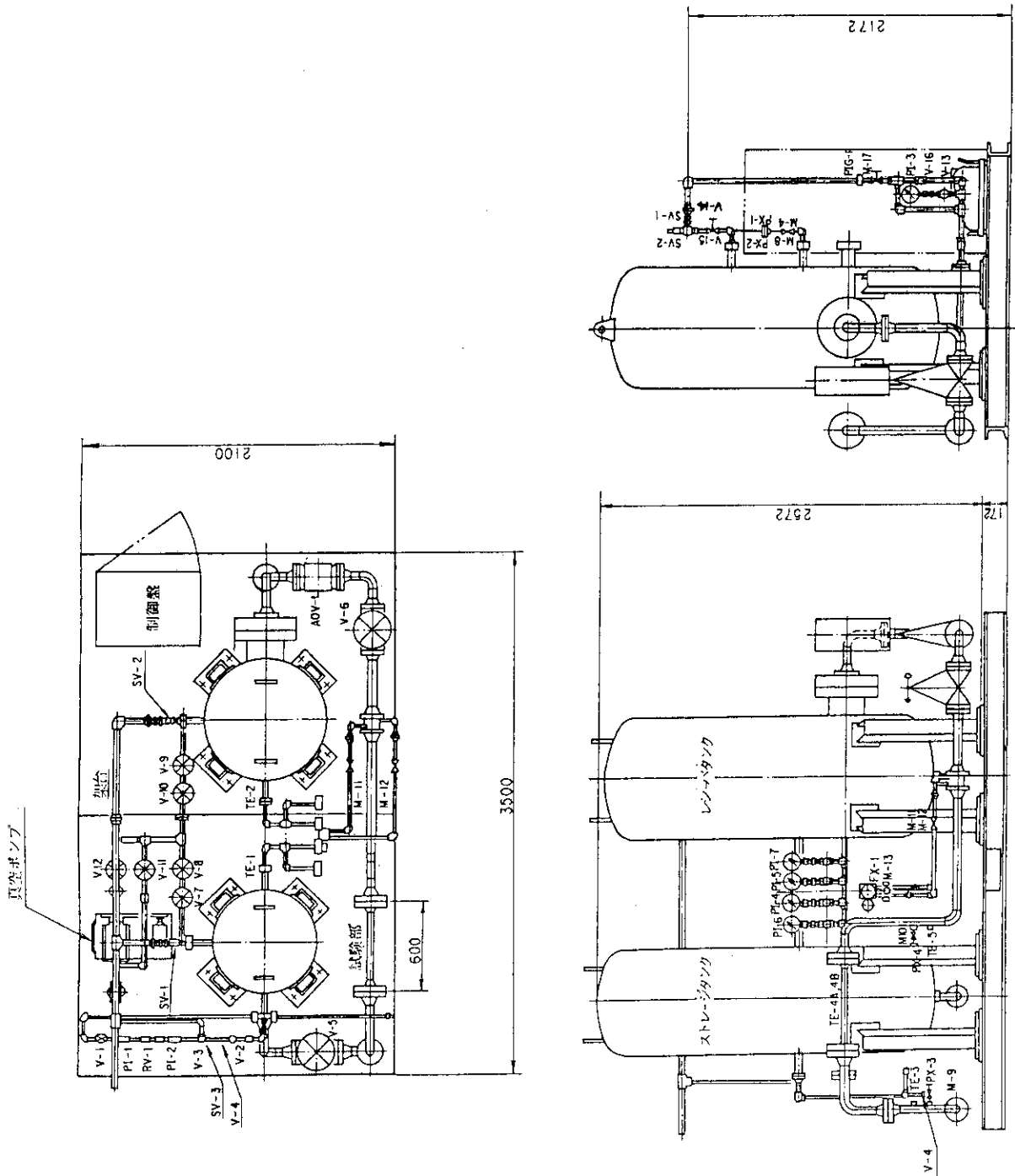


Fig. 3.2 Outline of blow-down test apparatus

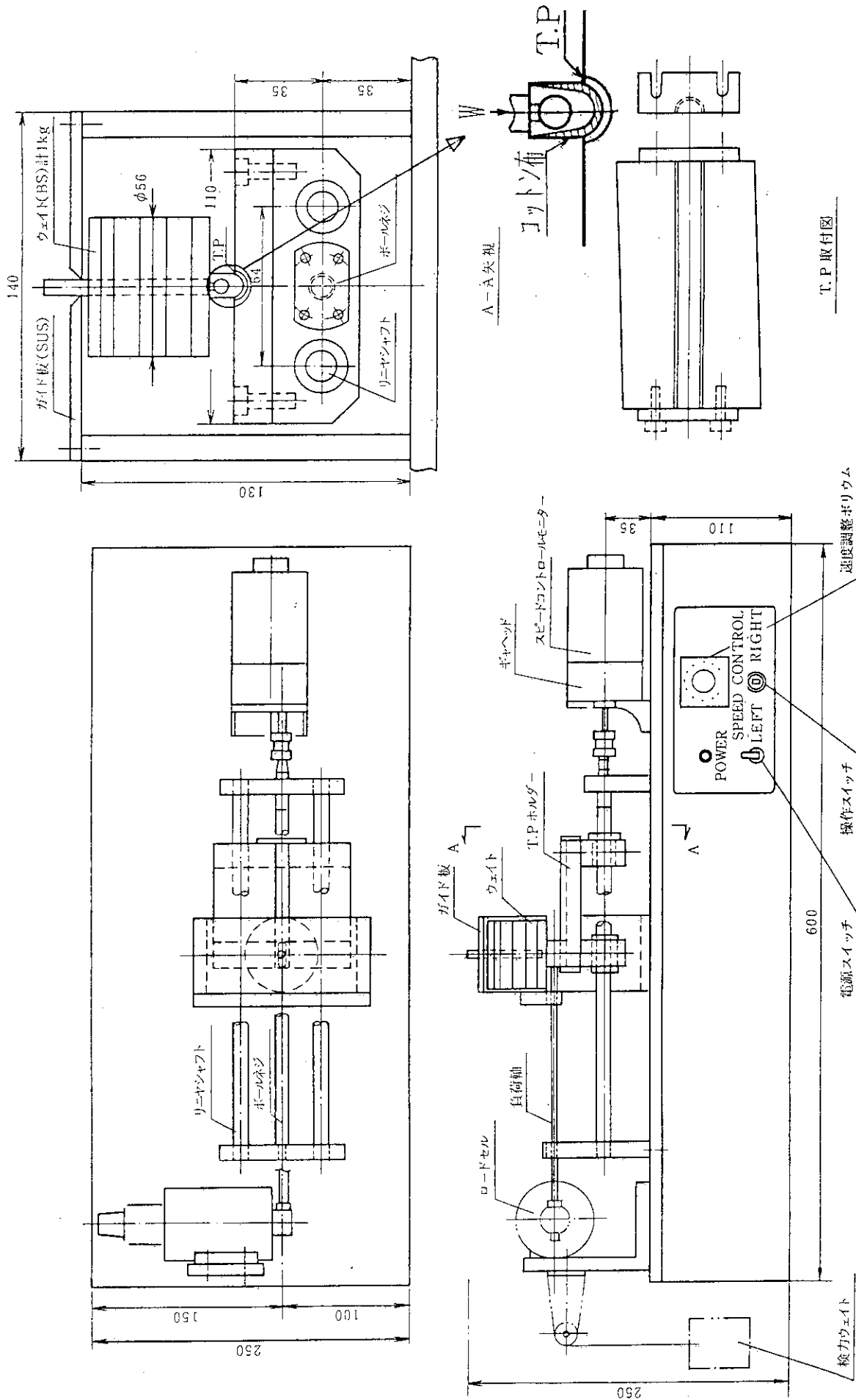


Fig. 3.3 Configuration of wipe-off test apparatus

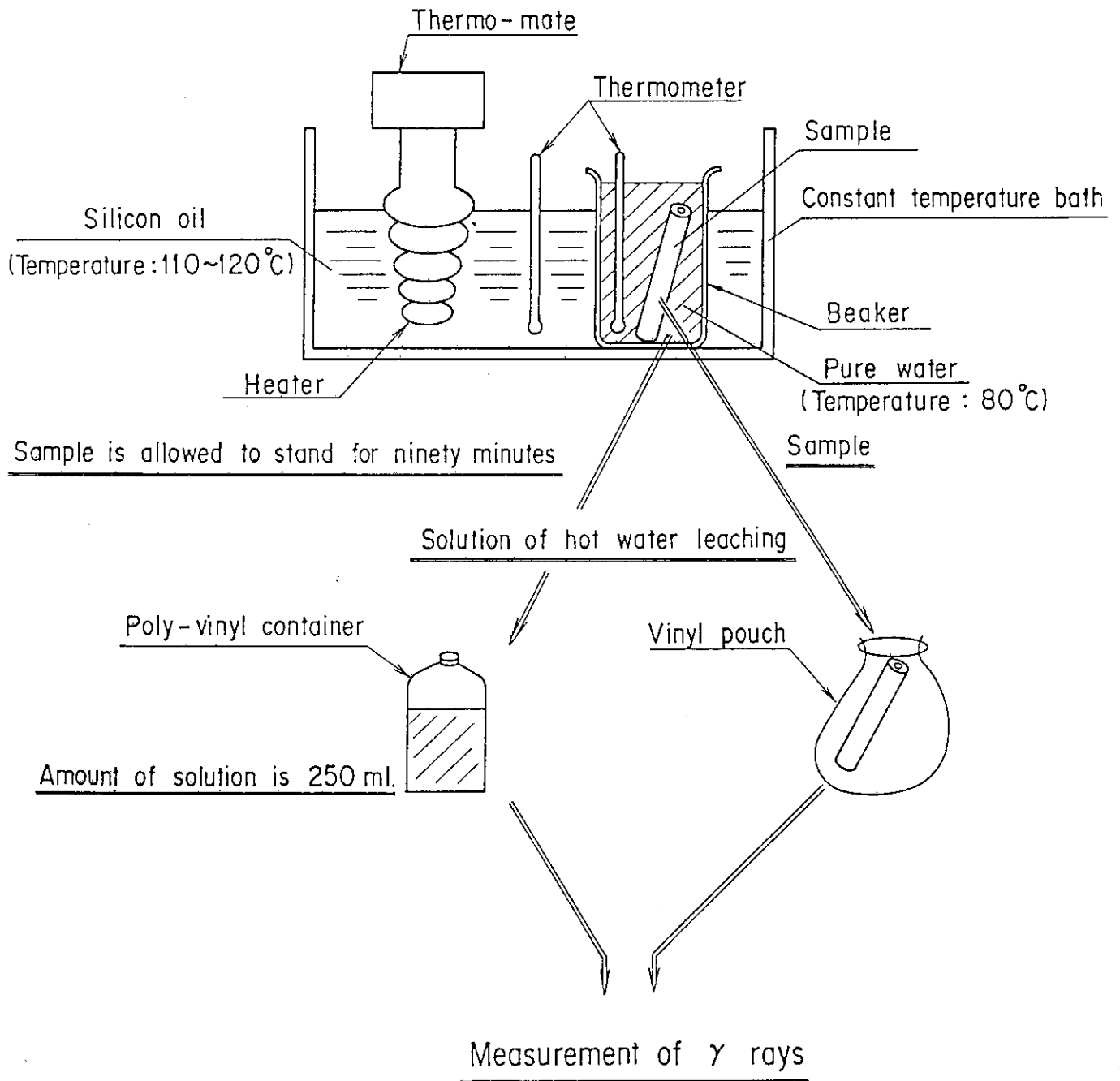


Fig. 3.4 Procedure of hot water washing test

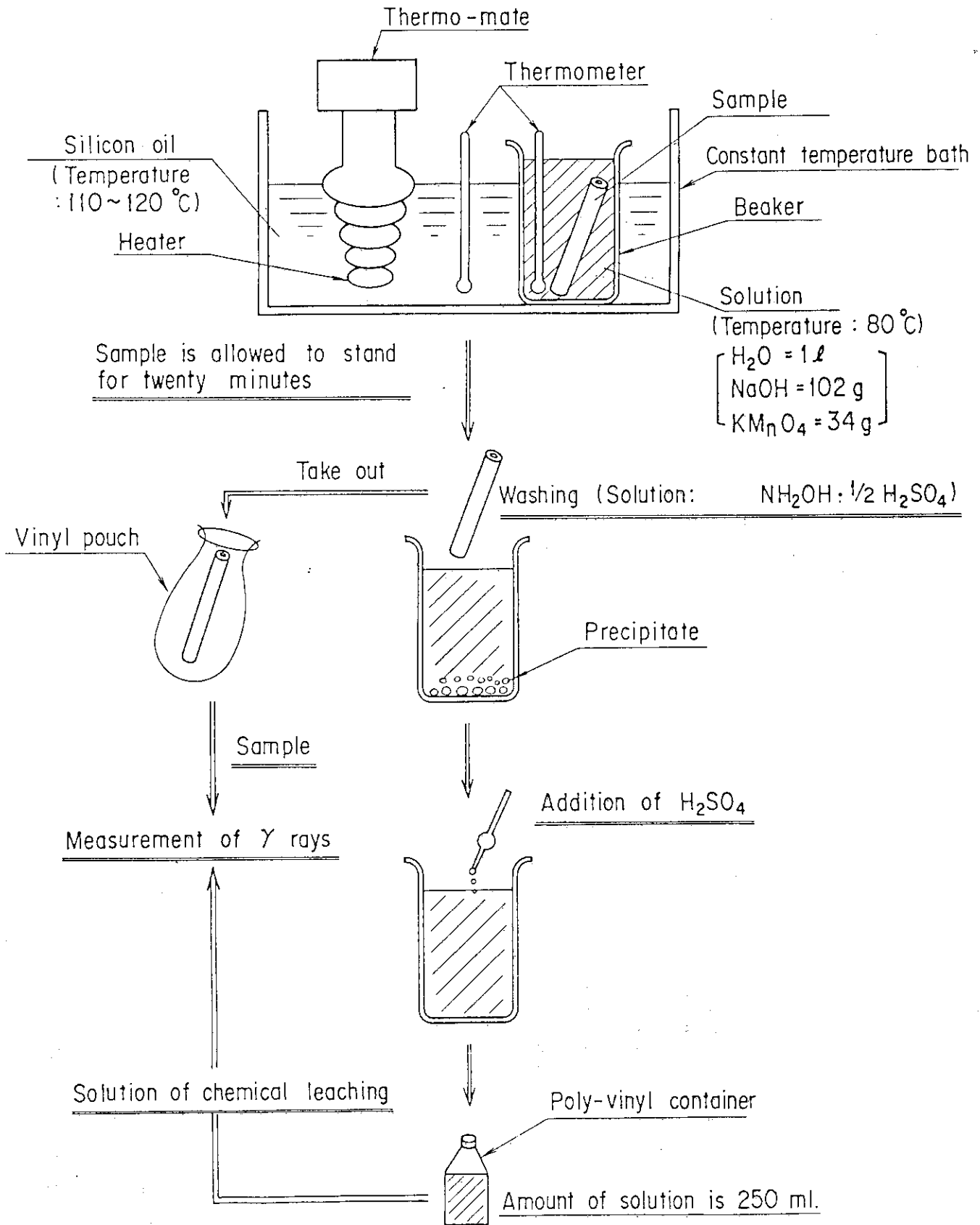


Fig. 3.5 Procedure of chemical leaching test

4. 考察

4.1 ブローダウン試験

2章で述べたように、沈着FPの離脱は種々の機構が複雑に絡み合って生じるが、本試験は実際の設計評価上の簡便さを考慮し、海外におけるモデル、即ちせん断力比による離脱割合の記述モデルを仮定して行った。ブローダウン試験結果をせん断力比についてまとめたものをFig. 4.1に示す。図中の●はセシウムに関するデータを、▲はよう素に関するデータを示している。セシウムの離脱割合は、Cs-137及びCs-134の離脱割合の相加平均とした。図中の実線は、せん断力比と離脱割合の相関を見るために示した、セシウム、よう素それぞれについてのせん断力比に対する離脱割合の回帰直線である。回帰直線の計算方法は付録-3に示した。

図より、離脱割合のばらつきは大きく、同程度のせん断力比に対しても離脱割合は大きく異なっているが、セシウムに較べてよう素の方が離脱割合が大きいことが分かる。データのばらつきの原因として、試料の表面状態の差等いくつかの理由が考えられるが本試験結果のみからは明かではない。

図中の点線は、せん断力比が1の場合（すなわち、沈着時と減圧時の状態の変化がない場合）の離脱割合を零と仮定したときの、せん断力比に対する離脱割合の包絡線である。データのばらつきから考えて、せん断力比だけでブローダウン時の離脱割合を記述することは、必ずしも妥当ではないが、少なくともせん断力比で離脱割合を整理した場合には、せん断力比が大きくなると、離脱割合も大きくなることが分かる。一方、包絡線を下回っているデータが多数存在することは、ブローダウン時の離脱割合を決める、せん断力比以外のパラメータが存在していることを示唆している。

4.2 拭取り試験、温水洗浄及び化学リーチング試験

2章で述べたように、拭取り試験はブローダウン試験を超える高せん断力状態における離脱割合を求めるために行った。温水洗浄試験は、試験片表面に付着しているダスト中及び試験片表面に付着しているFPの割合を検討するために、化学リーチング試験は、試験片表面の酸化皮膜内のFPの割合を検討するために行った。

Fig. 4.2に試験結果をまとめて示す。これらの試験は、半減期が長いセシウムについて行った。図中の●はブローダウンによる離脱割合を、▲は温水洗浄による除去割合（ブローダウン試験を行った後の試料を用いた場合はブローダウンによる離脱割合も含む）を、■は化学リーチングによる除去割合（温水洗浄による除去割合を含む。ブローダウン試験を行った後の試料を用いた場合はブローダウンによる離脱割合も含む）を示す。◆は拭取り試験による離脱割合（ブローダウンによる離脱割合も含む）を示す。ブローダウン試験データと比較できるように、図の横軸はせん断力比としている。ブローダウン試験を行わず、温水洗浄及び化学リーチング試験を行った試料のデータ（7点）は、図の右側にまとめて記載している。

化学リーチング試験までを行うと、ほぼ全量のFPが除去されている。従って、試料に沈着し

ているFPのほとんどは酸化皮膜よりも表面側に存在しており、試料金属母材内に拡散侵入しているFPはほとんど存在していないことが分かる。このことは、試料の沈着時間が短いことを考慮すると、予想通りの結果である。

ブローダウン試験による離脱割合及び温水洗浄試験による除去割合から、ブローダウン試験を行ったせん断力比の範囲（約135まで）では、試料表面のFPはブローダウンにより離脱しきっていないことが分かる。また、拭取り試験結果から、拭取りによっても試料表面のFPがすべて取りきられていないことが分かる。このことは、試料表面の微細構造（微細な凹凸）の隙間に入り込んでいるFPが多いことを示唆していると考えられる。さらに、酸化皮膜はブローダウン及び拭取りによって大量に剝離していないことも分かる。ブローダウン試験及び拭取り試験結果から、流速の上昇のみによるセシウムの離脱割合には、20～30%程度に上限があることが分かる。

4.3 ダスト離脱試験結果との比較

前述のように、OGL-1には黒鉛ダストがほとんど存在しないため、本試験ではダストに吸着しているFPの離脱割合に関する情報を得ることはできなかった。そこで、FPを用いずに黒鉛ダストを強制付着させた試料からのダストの離脱割合を重量測定により求める、ダストブローダウン試験を行った⁽⁷⁾。試験装置の概要をFig. 4.3に示す。

ダストブローダウン試験結果をせん断力比に対してプロットしたものをFig. 4.4に示す。図中の●は窒素ガスを用いた外径25.4mmの試料（HTTRの1次加圧水冷却器伝熱管外径に等しい）からの離脱割合を、▲は外径60.5mmの太い試料からの、■はブローダウンガスとしてヘリウムを用いた場合の離脱割合を示している。◆は、米国で行ったダストを加えた離脱実験（CPL-2試験）の結果⁽⁴⁾である。図中の実線は、4.1節と同様な考え方で算出した、●のデータに対する回帰直線である。

Fig. 4.1及び4.4の比較より、減圧事故条件下におけるダストの離脱割合は、本試験における離脱割合よりも大きく、FPが付着したダストが大量に発生するような原子炉の減圧事故時の被ばく評価においては、ダストの離脱によるFPの系統外放出が結果に大きな影響を及ぼすことが予想される。

4.4 HTTRの安全評価における離脱割合評価モデル

HTTRの安全評価においては、減圧事故（1次冷却設備二重管破断事故）時の離脱割合をせん断力比の関数として評価している⁽¹¹⁾。被ばく評価上重要な沈着FPであるセシウム及びヨウ素に関する離脱割合の評価（設計）式をそれぞれFig. 4.5及び4.6に示す。評価式は、せん断力比が1、すなわち通常の運転から状態の変化がない場合には、離脱割合は零であると仮定し、せん断力比の小さい領域については米国及び原研の実験結果を包絡するように作成した。離脱割合の上限値は、拭取り試験等の結果に基づき工学的判断で定めた。一方、せん断力比は、1次冷却設備内の事故後の減圧挙動を計算するRATSAM6コード⁽¹²⁾の結果を用いて評価する。通常運転時における1次冷却設備内の沈着分布はPLAINコード⁽²⁾を用いて計算する。

4.1節で考察したように、ここで行ったブローダウン試験から、離脱割合は単純にせん断力比のみで記述できるとは必ずしも言えない。しかしながら、以下の理由からHTTRの安全評価は

上記の評価式を用いて行った。

- ① F P 離脱に関していくつかのモデルが提案はされている⁽⁵⁾が、現状では確定されたものではなく、また、実験の裏付けも無い。
- ② 事故（各種事故）においても沈着 F P の全量離脱を仮定するのは明らかに過大評価である。
- ③ せん断力比モデルは、米国のフォートセントブレイン炉の安全審査において認められた実績がある。⁽¹³⁾
- ④ 評価式は、H T T R の減圧事故を模擬したブローダウン試験等を包絡するように定めており、結果として保守的な評価となっている。
- ⑤ 被ばく評価においては、沈着 F P 量等も保守的な評価を行っており、周辺公衆に与える被ばくのリスクを過小評価する可能性はほとんど無い。
- ⑥ 設計・評価が簡便である。

1 次冷却設備内のせん断力比及び沈着分布を用いて計算した、H T T R の減圧事故時の離脱割合は、セシウム 30%、よう素 60% である。また、H T T R で行っている立地評価のための重大事故及び仮想事故の評価⁽¹⁴⁾では、沈着 F P の離脱割合は保守的に、重大事故時にはせん断力比に係わらず離脱割合の上限値を、仮想事故時には全量離脱を仮定している。

なお、ここで得た実験結果に基づき、せん断力比モデルに替わる、より詳細な離脱モデルを確立することが今後の課題である。

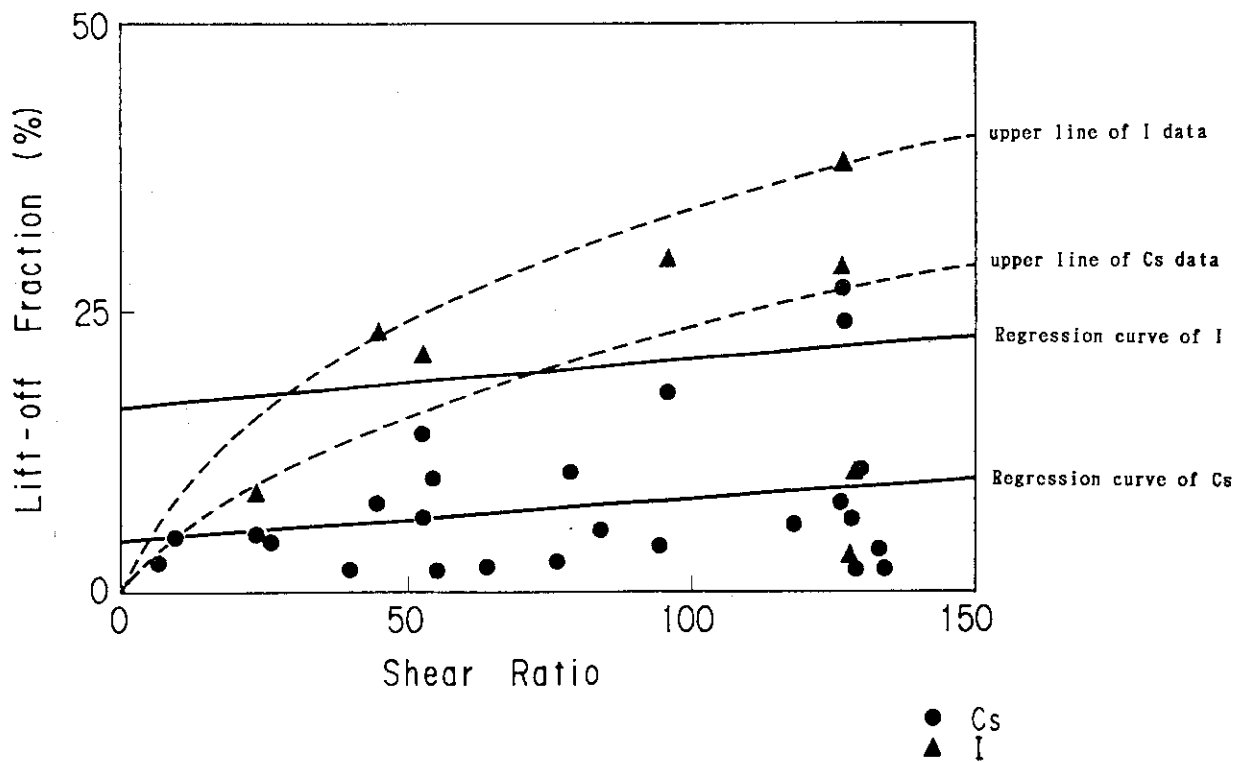


Fig. 4.1 Results of blow-down tests

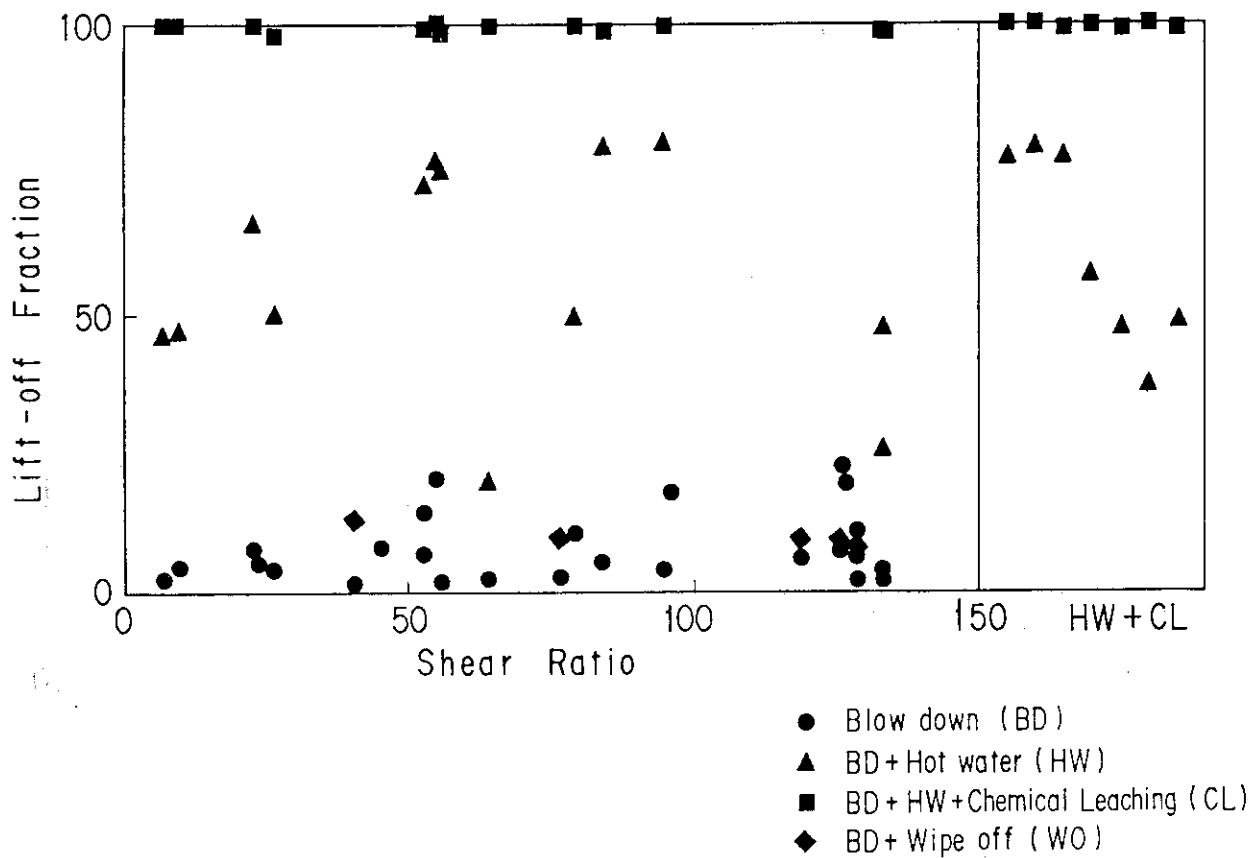


Fig. 4.2 Results of lift-off experiment

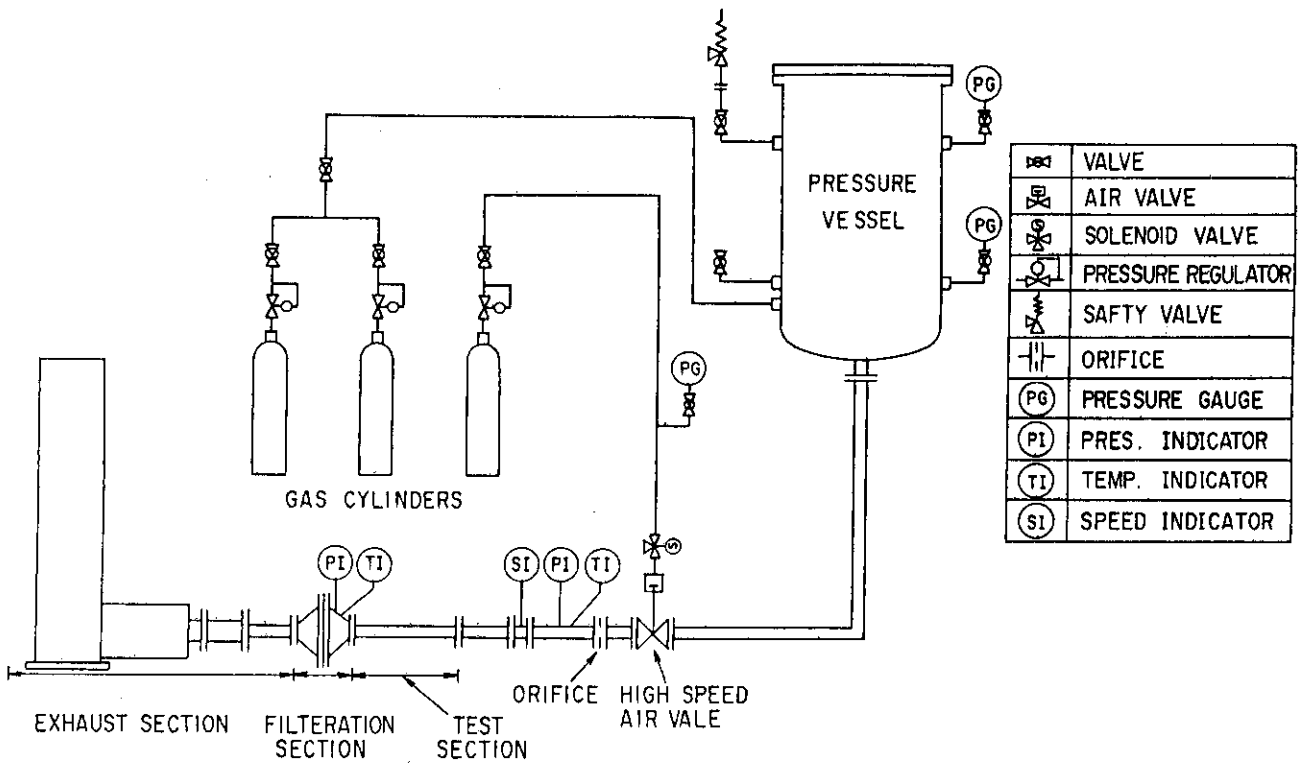


Fig. 4.3 Flow diagram of dust blow-down test apparatus

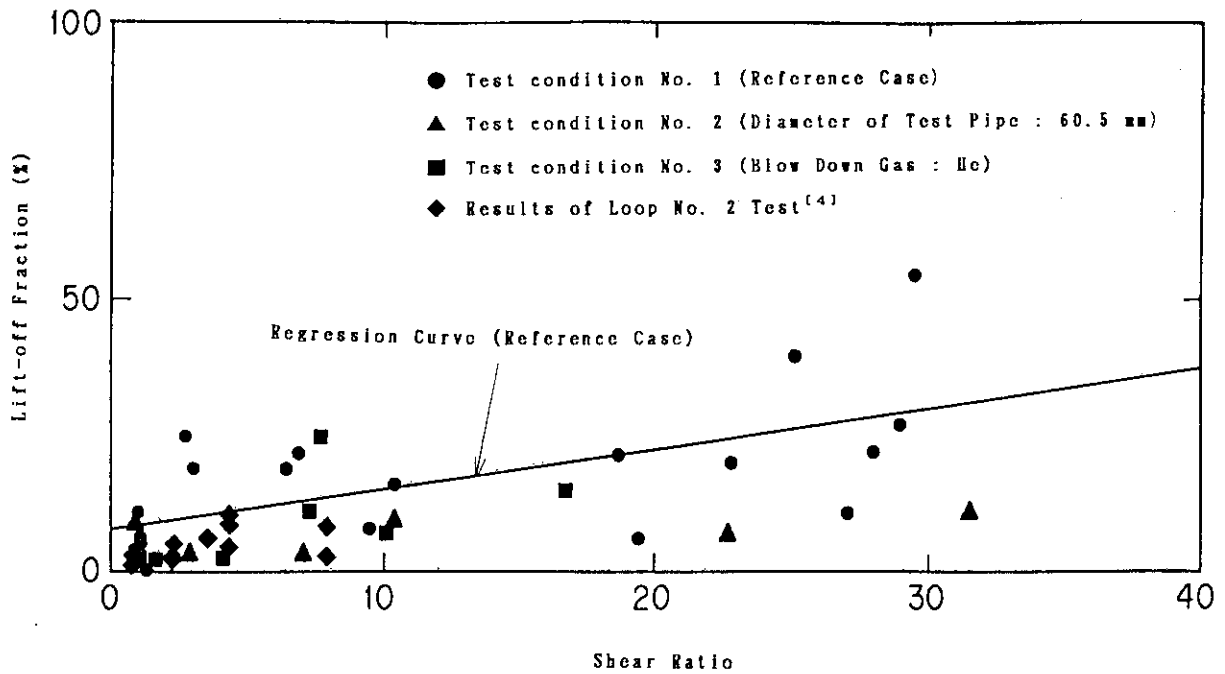


Fig. 4.4 Lift-off Fraction of Dust (as a function of shear ratio)

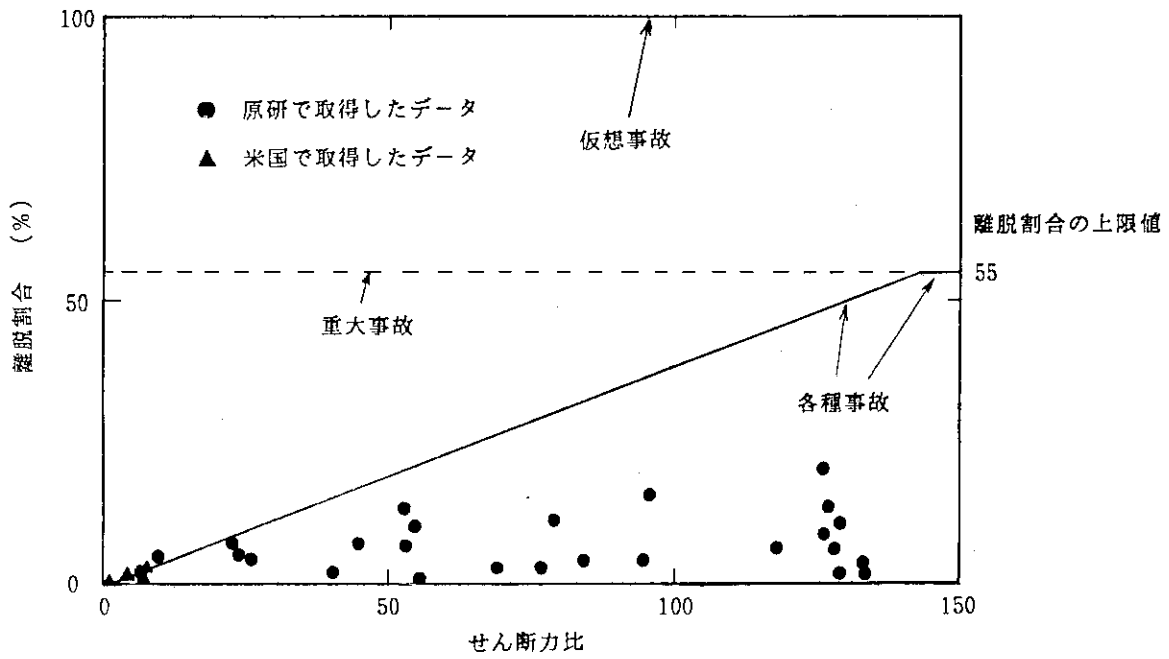


Fig. 4.5 Lift-off model in safety analysis of HTTR (Cs)

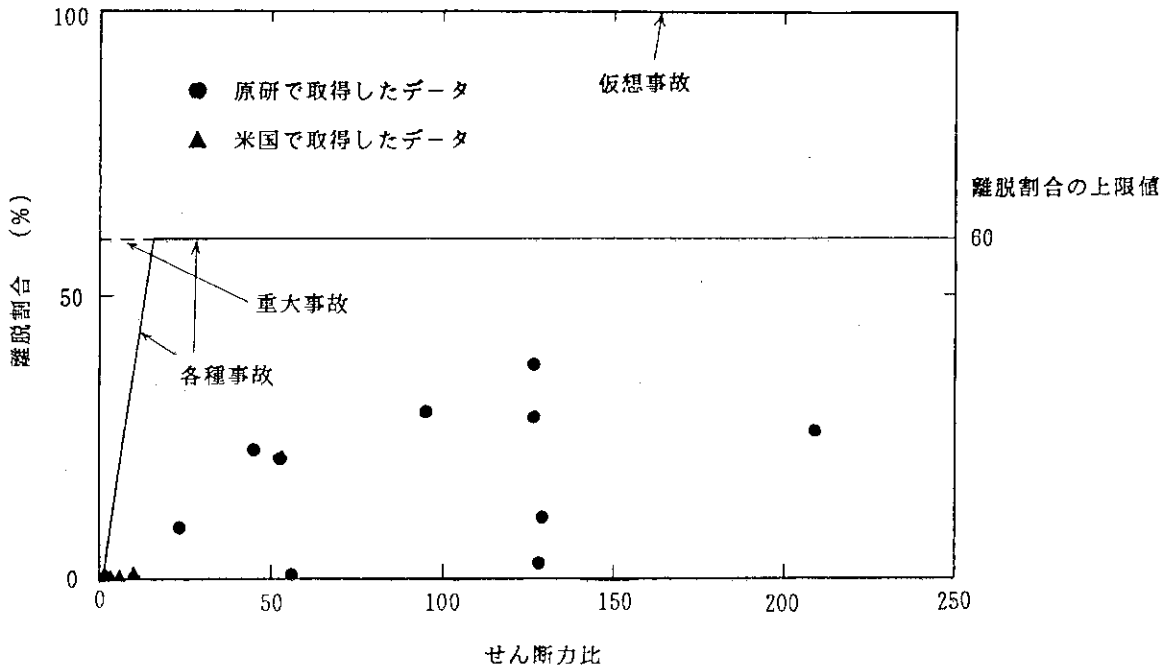


Fig. 4.6 Lift-off model in safety analysis of HTTR (I)

5. まとめ

高温ガス炉の減圧事故状態を模擬して沈着F Pの離脱実験を行い、これに基づき事故時の離脱割合評価モデルの検討を行った。

実験としては、大口径破断を想定したせん断力比の大きい範囲までのブローダウン試験、拭取り試験、温水洗浄及び化学リーチング試験を行った。これらの実験から、以下のことが明らかになった。

- ① これまでの実験結果を超えるせん断力比の範囲まで、ブローダウンによる沈着F Pの離脱割合は、せん断力比とともに大きくなる。
- ② 同一条件下では、よう素の離脱割合の方がセシウムの離脱割合よりも大きい。
- ③ 試料表面の微細構造及び酸化皮膜は、減圧事故条件下においても大量に剝離しないと考えられる。このことから、流速の上昇のみによるF Pの離脱割合には上限値があり、その値は本試験からはセシウムで約20～30%程度である。
- ④ 別途行ったダストの離脱試験との比較から、ダストの方が離脱割合が大きい。

これらの結果に基づき、H T T Rの安全評価に用いる離脱割合評価方法をせん断力比の関数として定めた。

なお、離脱割合に関する詳細な物理モデルの開発が米、独を中心に始まっており、原研においてもここで得られた実験データを踏まえて、より詳細なモデルの検討・開発を行っていくことが今後の課題である。

謝 辞

本検討に当たっては、高温工学試験研究炉開発部及び材料試験炉部の方々の協力を頂いた。特に、斎藤伸三高温工学試験研究炉開発部次長には、実験計画の段階から多くの御指導を頂いた。また、田中利幸H T T R原子炉開発室長、数土幸夫H T T R原子炉計画室長、新藤雅美界面工学研究室長及び新藤隆一原子炉グループリーダーには報告書作成に当たって貴重な助言を頂いた。馬場治H T T Rプラント開発室長には、沈着及び離脱モデルの検討において貴重な助言を頂いた。以上の方々に深く感謝いたします。

5. まとめ

高温ガス炉の減圧事故状態を模擬して沈着F Pの離脱実験を行い、これに基づき事故時の離脱割合評価モデルの検討を行った。

実験としては、大口径破断を想定したせん断力比の大きい範囲までのブローダウン試験、拭取り試験、温水洗浄及び化学リーチング試験を行った。これらの実験から、以下のことが明らかになった。

- ① これまでの実験結果を超えるせん断力比の範囲まで、ブローダウンによる沈着F Pの離脱割合は、せん断力比とともに大きくなる。
- ② 同一条件下では、よう素の離脱割合の方がセシウムの離脱割合よりも大きい。
- ③ 試料表面の微細構造及び酸化皮膜は、減圧事故条件下においても大量に剝離しないと考えられる。このことから、流速の上昇のみによるF Pの離脱割合には上限値があり、その値は本試験からはセシウムで約20～30%程度である。
- ④ 別途行ったダストの離脱試験との比較から、ダストの方が離脱割合が大きい。

これらの結果に基づき、H T T Rの安全評価に用いる離脱割合評価方法をせん断力比の関数として定めた。

なお、離脱割合に関する詳細な物理モデルの開発が米、独を中心に始まっており、原研においてもここで得られた実験データを踏まえて、より詳細なモデルの検討・開発を行っていくことが今後の課題である。

謝 辞

本検討に当たっては、高温工学試験研究炉開発部及び材料試験炉部の方々の協力を頂いた。特に、斎藤伸三高温工学試験研究炉開発部次長には、実験計画の段階から多くの御指導を頂いた。また、田中利幸H T T R原子炉開発室長、数土幸夫H T T R原子炉計画室長、新藤雅美界面工学研究室長及び新藤隆一原子炉グループリーダーには報告書作成に当たって貴重な助言を頂いた。馬場治H T T Rプラント開発室長には、沈着及び離脱モデルの検討において貴重な助言を頂いた。以上の方々に深く感謝いたします。

参考文献

- (1) 露崎典平、他、「OGL-1におけるCs-137の沈着分布」、JAERI-M 88-225 (1988).
- (2) 馬場 治、露崎典平、沢 和弘、「高温ガス炉におけるFP沈着解析コード -PLAIN-」、JAERI-M 88-266 (1989).
- (3) 沢 和弘、馬場 治、「高温ガス炉におけるFP沈着解析コードPLAINの検証」、JAERI-M 91-084 (1991).
- (4) D. L. Hanson, "Results of the General Atomic Deposition Loop Program", GA-A 13140 (1976).
- (5) R. P. Wichner, "Fission Product Plateout and Liftoff in the MHTGR Primary System: A Review", NUREG/CR-5647 (1991).
- (6) N. Iniotakis, et. al., "Initial Results of Investigation into Fission Product Deposition in In-pile Experiments", Nucl. Eng. and Des., 34 (1975).
- (7) 沢 和弘、他、「ダスト離脱試験結果」、原研所内報(JAERI-memo 02-249).
- (8) 沢 和弘、他、「高温工学試験研究炉の遮蔽設計における核分裂生成物線源評価」、JAERI-M 91-198 (1991).
- (9) 松本実喜夫、他、「FP離脱実験に係るデータ集」、原研所内報(JAERI-memo 02-399).
- (10) 松本実喜夫、他、「FP離脱実験装置の概要及びその特性試験」、原研所内報(JAERI-memo 02-287).
- (11) K. SAWA, et. al., "Radiation Exposure in depressurization Accident of HTTR", Nuclear Safety, Vol. 32, No. 2, (1991).
- (12) R. K. Deremer, et. al., "RATSAM: A Computer Program to Analyze the Transient Behavior of the HTGR Primary Coolant System during Accidents", GA-A 13705 (1977).
- (13) Public Service Company of Colorado, "Fort St. Vrain Nuclear Generating Station Final Analysis Report", (1968).
- (14) 沢 和弘、他、「HTTRの立地評価」、JAERI-M 91-158 (1991).

付録1 ブローダウン試験片部流速の算出方法

本実験は、減圧事故を模擬した時に配管内面に沈着しているFPの離脱割合とSRとの関係を求めるために行うものである。SRは通常運転時と減圧事故模擬時の圧力、流速、温度に関係すること及びその計算式は第2章で述べた。通常運転時つまり試験片にFPを沈着させた時の運転条件 P_N 、 V_N 、 T_N は、運転実績から知ることができ、既知数となる。また、減圧事故を模擬した時の T_B は試験片部の温度計測データから、 P_B は試験部前・後2点の圧力計測データを平均することによって、それぞれ得られる。残るは V_B の数値であるが、ヘリウムガス流体で流速測定範囲が10～600m/sで、かつ測定精度が保証できる市販の流速計が無かったために、試験片部下流側にオリフィスを取付けて差圧を計測し、計算によって求めることにした。絞り機構による流量測定方法（JIS Z 8762-1969）から、オリフィス板を用いて円形管路内を流れる流体の質量を求め、これを試験片部を流れる時のヘリウムガス密度及び流路断面積で除して流速を計算した。

質量流量の算出式は、次の通りである。

$$q_m = \alpha \times \epsilon \times (\pi/4) d^2 \times \sqrt{2 \times \Delta P \times \rho}$$

ここで、 q_m ：質量流量（kg/s）、

α ：流量係数、

ϵ ：気体の膨張補正係数、

d ：使用状態におけるオリフィスの絞り孔径（m）、

ΔP ：差圧（kg/m・s²）、

ρ ：上流側圧力取出し口におけるヘリウムガスの密度（kg/m³）

である。

流速の計算手順を次項以下に示す。

A 1.1 流速計算に必要な計測値

- 試験片部温度： t_B （°C）
- 試験片部上流側温度： t_u （°C）
- 試験片部下流側温度： t_d （°C）
- 試験片部上流側圧力： P_u （kg/cm²・G）
- 試験片部下流側圧力： P_d （kg/cm²・G）
- 差圧： ΔP （mmAq）

A 1.2 入力値

- オリフィスの絞り孔径： d_1 (小流量用) = 1.599×10^{-2} (m)
 d_m (大流量用) = 3.207×10^{-2} (m)
- オリフィス上流側管径： $D = 5.27 \times 10^{-2}$ (m)
- 断熱指数： $\kappa = 1.66$
- 補正係数： $r_{re} = 1.0$

A 1.3 単位換算

- 温度： T (K) = $t + 273.15$ 添字は略す。
- 圧力： P_a (MPa) = $(P + 1.033) / 10.197$ 添字は略す。
- 差圧： $\Delta P'$ (kg/cm²) = $(1 \times 10^{-4}) \times \Delta p$
 ΔP (kg/m · s²) = $9.8 \times \Delta p$

A 1.4 ヘリウムガス密度の算出

ヘリウムガス密度は T (K), P_a (MPa) に対する物性値として流速計算プログラムに内蔵した。

- オリフィス上流側の密度： T_d, P_{da} 時の密度を内蔵データより引き出した。
- 試験片部の密度： P_{ua}, P_{da} の平均値 P_B と T_B 時の密度 ρ_B を内蔵データより引き出した。

A 1.5 流量係数の算出

流量係数： α は、コーナータップの流量係数 (α_0) と補正係数 (r_{re}) の積で求められる。 α_0 はレイノルズ数 (R_e) とオリフィスの絞り直径比 (β (d/D)) の 4 乗に関する数値で、流速計算プログラムに内蔵した。

- 仮流速の算出： R_e を求めるために、仮の流速 (v_t) を計算する。

$$v_t \text{ (m/s)} = \sqrt{(2 \times \Delta P) / (\rho_d \times 0.6)}$$

ここで、係数 0.6 は流量係数 (α) の概算値である。

- 粘性係数： η の算出： η (kg · s/m²) = $\left[\frac{1.7986}{980 \times 10^4} \times 0.8779 \times \left\{ \frac{T_d}{6.03} \right\}^{0.6452} \right]$

- 動粘性係数 (ν) の算出 : $\nu (\text{m}^2/\text{s}) = (\eta \times 9.8) / \rho_d$
- レイノルズ数 (R_e) の算出 : $R_e = (v_t \times D) / \nu$
- 流量係数 (α) の算出 : $\alpha = \alpha_0 \times r_{Re}$

ここで、 α_0 は R_e と β^4 によって決まる数値で、内蔵データより引き出した。

A 1.6 ガスの膨張補正係数の算出

ガスの膨張補正係数 (ε) は、下記式により計算する。

$$\varepsilon = 1 - (0.3707 + 0.3184 \times \beta^4) [1 - (P_2 / P_1)^{1/\kappa}]^{0.938}$$

ここで、 β : オリフィスの絞り直径比 ($=d/D$) ,

P_1 : オリフィス入口の圧力 ($=P_d + 1.033 (\text{kg/cm}^2)$) ,

P_2 : オリフィス出口の圧力 ($=(P_d + 1.033) - \Delta P (\text{kg/cm}^2)$) ,

κ : 断熱指数

である。

A 1.7 オリフィス部の質量流量

オリフィス部の質量流量 (q_m) は、下記式を用いて計算できる。

$$\begin{aligned} q_m (\text{kg/s}) &= \alpha \times \varepsilon \times (\pi/4) d_1^2 \times \sqrt{2 \times \Delta P \times \rho_d} && (\text{小流量時}) \\ &= \alpha \times \varepsilon \times (\pi/4) d_m^2 \times \sqrt{2 \times \Delta P \times \rho_d} && (\text{大流量時}) \end{aligned}$$

A 1.8 試験片部の流速

$$V_B (\text{m/s}) = \frac{q_m}{\rho_B \times (\pi/4) \cdot 0.01^2}$$

ここで、係数0.01は試験片内径 (m) である。

付録2 ブローダウン試験装置の流量特性測定試験例

A 2.1 試験目的

流量特性測定試験はストレージタンク、レシーバータンクそれぞれの初期圧力を $40 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{G}$ 、大気圧に設定して減圧試験を行い、実験装置本体及びデータ収録・処理装置が正常に作動することを確認すると共に、試験片部におけるガス流速と流量調節弁の開度との関係を求めるために実施した。

A 2.2 試験内容

試験は、大流量用及び小流量用オリフィスそれぞれについて、流量調節弁の開度を任意に設定して各5回の計10回行った。使用したガスはヘリウムである。試験条件をTable A 2.1に示す。尚、データ収録間隔は温度、圧力、差圧とも0.02秒である。

A 2.3 試験手順

実験装置の運転要領書に基づき試験前状態を確認し、流量調節弁の開度を設定する。実験装置側のフレキシブル配管をヘリウムガスカードルに接続して、ストレージタンクから空気操作仕切弁までの系統を $40 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{G}$ まで昇圧する。昇圧後、10分程度保持してフランジ、バルブ等各部配管の漏洩を確認すると共に実験前の初期値を確認する。試験は、空気操作仕切弁を開にすると同時にデータ収録を開始し、任意に時間（60秒以内）が経過した後、空気操作仕切弁を閉にして終了する。

A 2.4 試験結果

本試験により、次の結果が得られた。

- ① 試験による実験装置の異常は、無かった。
- ② 計測データは、0.02秒間隔で収録していることが確認された。実験No. TE 12401の収録データ履歴（0.00～0.98秒）を、Table A 2.2に示す。また、TE 12402の各部温度及び圧力の変化をFig. A 2.1, Fig. A 2.2に示す。
- ③ 収録データをプログラム処理することによって、試験片部流速と流量調節弁開度との関係が求められた。時間経過に対する流速の変化をそれぞれのオリフィスについてFig. A 2.3, Fig. A 2.4に示す。また、流量調節弁開度－流量（流速）の関係をFig. A 2.5に示す。大量用オリフィスでは、開度と流量はほぼ比例関係にあることがわかった。これは、CV曲線から計算したものと大きく異なっている。
- ④ ストレージタンク圧力指示値が 0.5 kg/cm^2 と小さいので、校正の必要が生じた。

Fig. A2.1 Test conditions

試験No.	流量調節弁 開度 (mm)	ストレージタンク 圧力 (kg/cm ² · G)	レシボータンク 圧力 (kg/cm ² · G)	オリフィス区分 (): 絞り口径	データ収録 時間 (sec)
TE12401	22	40	0	大流量用 (φ32.07)	56.64
TE12402	19				29.98
TE12403	6				24.52
TE12404	12				19.52
TE12405	3				19.98
TE12701	2.0			小流量用 (φ15.99)	38.80
TE12702	0.5				60
TE12703	1.0				19.74
TE12704	1.5				19.98
TE12705	1.8	40	0		19.54

Table A2.2 Example of output

時 (秒)	入口圧力 (kg/cm ² -G)	出口圧力 (kg/cm ² -G)	ス・圧力 (kg/cm ² -G)	レ・圧力 (kg/cm ² -G)	入口温度 (°C)	出口温度 (°C)	レ・温度 (°C)	ス・温度 (°C)	試料温度 (°C)	差圧 (mmHg)	流量 (m ³ /s)	流速 (m/s)
0.00	40.0	40.0	39.5	-0.2	21	21	21	23	20	-8	0.00E+00	0
0.02	39.9	40.0	39.5	-0.1	21	21	21	28	20	-10	0.00E+00	0
0.04	39.9	40.0	39.5	-0.2	21	22	21	28	20	-10	0.00E+00	0
0.06	39.8	36.5	39.4	-0.1	21	22	21	28	19	-10	0.00E+00	0
0.08	39.8	32.9	39.4	-0.0	21	22	21	26	20	-5	0.00E+00	0
0.10	39.7	29.6	39.3	0.0	21	21	21	28	20	8	0.26E-02	32
0.12	39.7	27.1	39.3	0.1	21	21	21	30	20	30	0.50E-02	64
0.14	39.6	25.3	39.3	0.2	21	21	21	28	21	63	0.72E-02	92
0.16	39.6	24.1	39.2	0.2	21	21	21	28	20	107	0.93E-02	113
0.18	39.5	23.0	39.1	0.3	21	21	21	28	20	158	0.11E-01	143
0.20	39.4	22.2	39.1	0.4	21	21	21	28	20	215	0.13E-01	166
0.22	39.4	21.4	39.0	0.4	21	22	21	28	21	281	0.15E-01	189
0.24	39.3	20.9	38.9	0.4	21	21	21	28	20	347	0.16E-01	209
0.26	39.2	20.6	38.9	0.5	21	22	21	28	20	418	0.18E-01	229
0.28	39.2	20.2	38.8	0.5	21	22	21	28	21	491	0.19E-01	248
0.30	39.1	20.0	38.8	0.7	21	22	21	28	19	565	0.21E-01	264
0.32	39.1	19.8	38.7	0.7	21	22	21	28	20	636	0.22E-01	281
0.34	39.1	19.6	38.7	0.7	21	21	21	28	20	733	0.24E-01	296
0.36	39.0	19.4	38.6	0.7	21	21	21	28	20	858	0.26E-01	326
0.38	38.9	19.2	38.6	0.9	21	21	22	29	20	927	0.27E-01	338
0.40	38.9	19.1	38.5	0.8	21	21	22	28	20	997	0.28E-01	351
0.42	38.7	19.1	38.4	0.9	21	22	22	28	20	1065	0.28E-01	363
0.44	38.7	19.0	38.4	0.9	21	21	22	28	20	1138	0.29E-01	375
0.46	38.6	18.9	38.3	0.9	21	21	23	28	20	1202	0.30E-01	386
0.48	38.6	18.9	38.3	1.0	21	21	23	28	20	1268	0.31E-01	396
0.50	38.6	18.7	38.3	1.1	21	21	23	28	20	1332	0.32E-01	406
0.52	38.5	18.6	38.2	1.1	21	21	24	28	20	1392	0.33E-01	414
0.54	38.5	18.6	38.2	1.1	21	21	24	28	20	1455	0.33E-01	425
0.56	38.3	18.6	38.0	1.2	21	21	25	28	20	1511	0.34E-01	432
0.58	38.3	18.5	38.0	1.2	21	21	25	28	21	1566	0.35E-01	442
0.60	38.3	18.5	37.9	1.3	21	21	26	28	19	1623	0.35E-01	448
0.62	38.2	18.4	37.9	1.3	21	21	26	28	20	1678	0.36E-01	457
0.64	38.1	18.4	37.8	1.4	21	21	26	28	20	1724	0.36E-01	463
0.66	38.1	18.4	37.8	1.4	21	21	27	28	20	1775	0.37E-01	470
0.68	38.1	18.4	37.8	1.4	21	21	27	28	20	1824	0.37E-01	477
0.70	38.0	18.3	37.6	1.4	21	21	28	28	20	1867	0.38E-01	483
0.72	37.9	18.3	37.6	1.5	21	21	28	28	20	1912	0.38E-01	487
0.74	37.9	18.2	37.5	1.5	21	21	29	28	19	1956	0.39E-01	494
0.76	37.8	18.1	37.5	1.5	21	21	29	28	20	1989	0.39E-01	499
0.78	37.8	18.1	37.5	1.6	21	21	30	28	20	2033	0.40E-01	505
0.80	37.6	18.0	37.4	1.7	21	21	30	28	20	2068	0.40E-01	509
0.82	37.7	18.0	37.4	1.7	21	21	31	28	20	2105	0.40E-01	514
0.84	37.6	18.1	37.3	1.7	21	21	32	28	20	2139	0.41E-01	518
0.86	37.5	18.0	37.2	1.7	21	21	32	28	20	2169	0.41E-01	523
0.88	37.5	17.9	37.2	1.8	21	21	33	28	21	2202	0.41E-01	527
0.90	37.4	18.0	37.1	1.8	21	21	33	28	20	2227	0.42E-01	533
0.92	37.4	17.9	37.0	1.8	21	21	34	28	20	2257	0.42E-01	536
0.94	37.4	17.8	37.0	1.9	21	21	34	28	20	2282	0.42E-01	536
0.96	37.3	17.7	36.9	2.0	21	21	35	28	20	2310	0.42E-01	540
0.98	37.2	17.7	36.9	2.0	21	21	36	28	20			

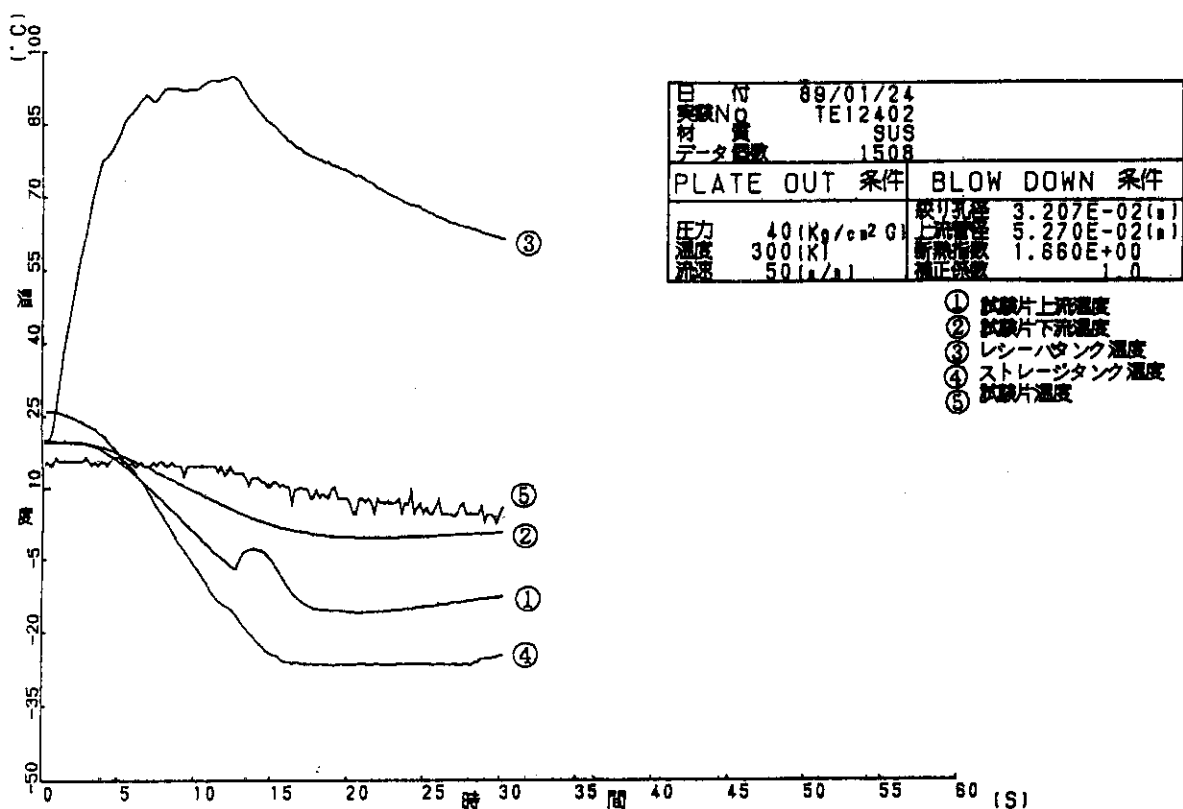


Fig. A2.1 Temperature transient

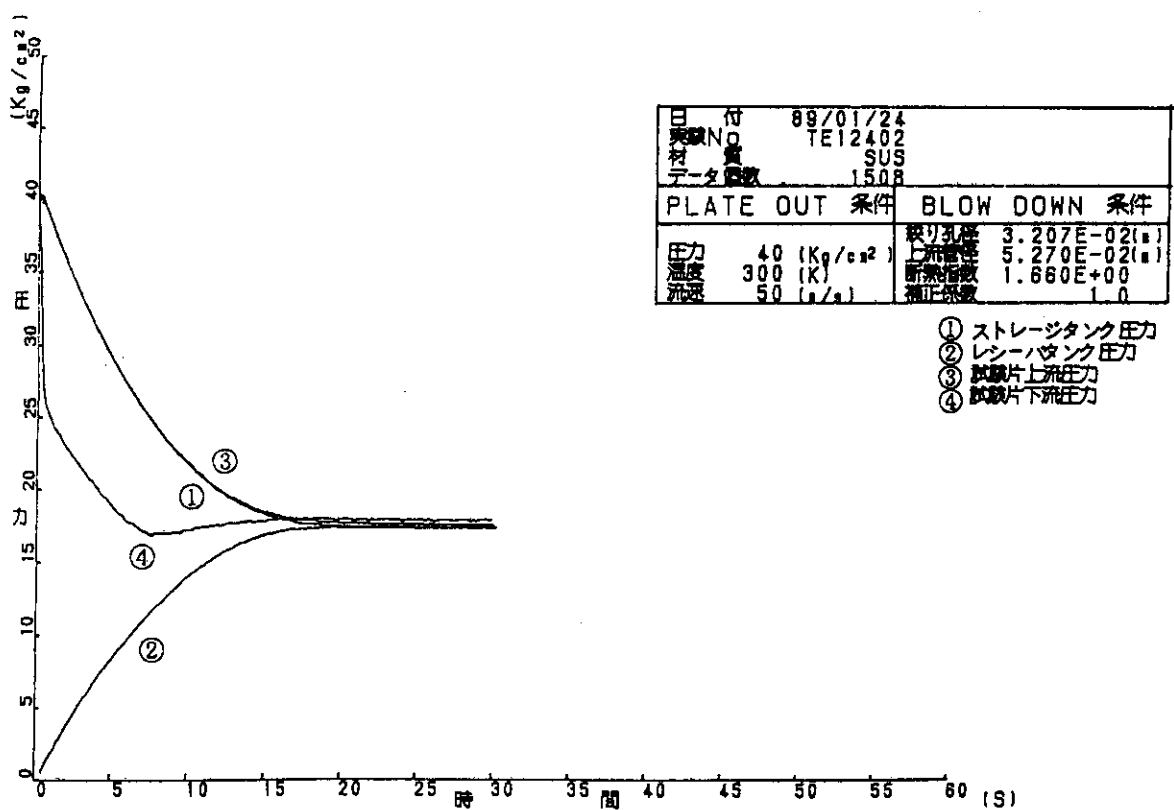


Fig. A2.2 Pressure transient

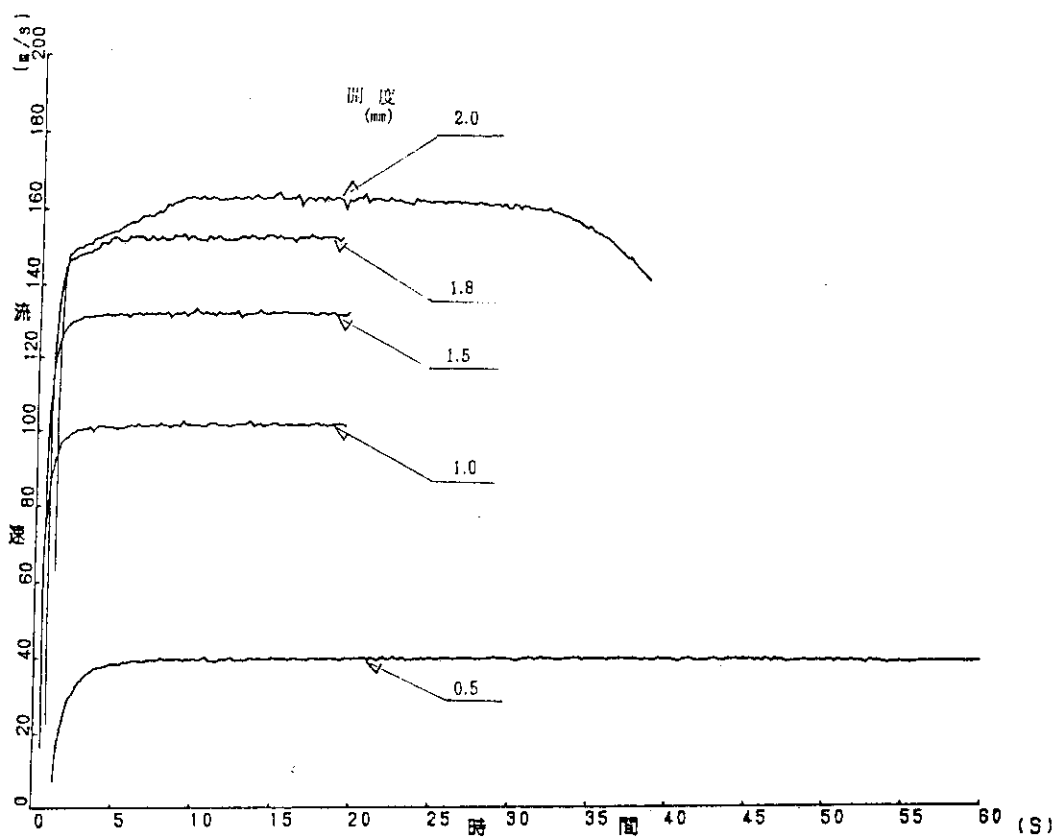


Fig. A2.3 Velocity change by flow value (small orifice)

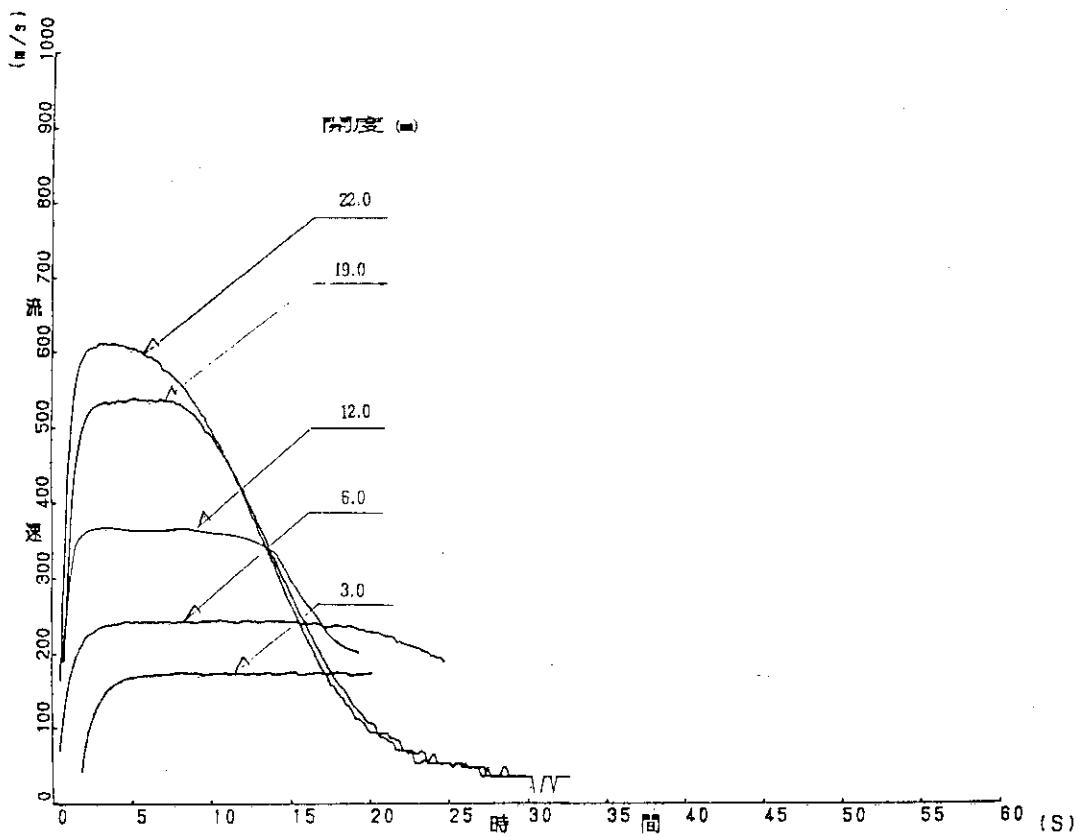


Fig. A2.4 Velocity change by flow value (large orifice)

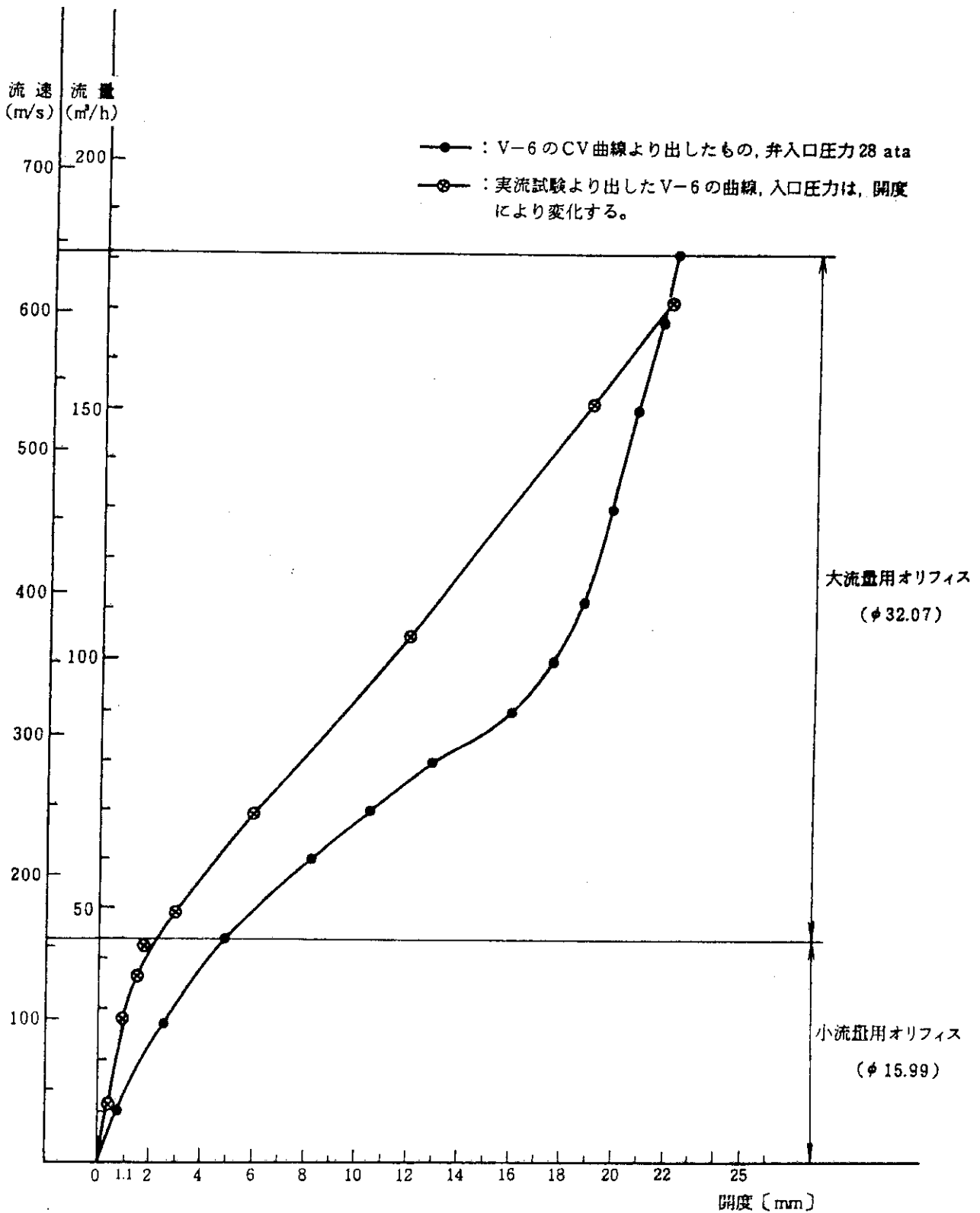


Fig. A2.5 Relationship between flow value and velocity

付録3 回帰直線の計算

A 3.1 基本的な考え方

実験データに対し、以下の処理を行う。

これまでの考え方にとらわれず、実験データから直線性のみを仮定すると、

$$L F = a \times (SR - 1) + b \quad \dots\dots\dots (A 3.1)$$

となる。この場合は、係数 a 、 b を最小自乗法（一般的に拡散して、回帰直線の係数）で求めることとなる。

A 3.2 具体的な方法

今、以下のような実験データがあるとする。

データ点数 : n

各データ座標 : (x_i, y_i) , $i = 1 \sim n$

これらのデータに対する以下の統計量を計算する。

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \dots\dots\dots (A 3.2)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad \dots\dots\dots (A 3.3)$$

$$S_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad \dots\dots\dots (A 3.4)$$

$$S_y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad \dots\dots\dots (A 3.5)$$

$$S_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad \dots\dots\dots (A 3.6)$$

ここで、これらのデータに対する相関式を (A 3.1) 式と仮定すると、係数 a 、 b は次のようになる。

$$a = \frac{S_{xy}}{S_x^2} \quad \dots\dots\dots (A 3.7)$$

$$b = \bar{y} - a \cdot \bar{x} \quad \dots\dots\dots (A 3.8)$$

参考文献

- (A 3.1) R.S. バーリントン, 他原著, 林 知己夫, 他監訳, 「確率・統計ハンドブック」, 森北出版
- (A 3.2) 「計測の不確かさ」, ANSI/ASME-PTC 19.1-1-1985