

JAERI-M  
89-051

高温配管の減圧試験

1989年5月

谷平 正典・国富 一彦・稲垣 嘉之  
佐藤 隆\*・宮本 喜晟

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。  
入手の間合わせは、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, 1989

---

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

高温配管の減圧試験

日本原子力研究所東海研究所高温工学部

谷平 正典・国富 一彦・稲垣 嘉之

佐藤 隆\*・宮本 喜晟

(1989年4月10日受理)

急速減圧時における高温配管の特性並びに高温配管内部構造物の健全性を把握するために、高温工学試験研究炉（HTTR）で使用される高温配管とほぼ同一の寸法及び同一の内部構造物を有する高温配管を使用して、減圧試験を行った。

試験パラメータは、常温の窒素ガス及びヘリウムガスによる減圧速度（0.14～3.08MPa/s）、スライドジョイント部開口面積（11.9～2036mm<sup>2</sup>）、高压容器内初期圧力（1.0～4.0MPa）である。その結果、ライナー管及び仕切板に発生する最大差圧は、各々2.69MPa、0.45MPaであった。全試験終了後、試験体として使用した高温配管を切断・分解し、内部断熱構造物である仕切板・断熱材・ライナー管及び耐圧管を検査したところ、損傷及び変形等の異常は見られなかった。

Depressurization Test on Hot Gas Duct

Masanori TANIHIRA, Kazuhiko KUNITOMI  
Yoshiyuki INAGAKI, Yutaka SATO\* and Yoshiaki MIYAMOTO

Department of High Temperature Engineering  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 10, 1989)

To study the integrity of internal structures and the characteristics in a hot gas duct under the rapid depressurization accident, depressurization tests have been carried out using a test apparatus installed the hot gas duct with the same size and the same structures as that of the High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR).

The tests have been performed with three parameters : depressurization rate (0.14-3.08 MPa/s) determined by orifice diameter, area of the open space at the slide joint (11.9-2036 mm<sup>2</sup>), and initial pressure (1.0-4.0 MPa) filled up in a pressure vessel, by using nitrogen gas and helium gas. The maximum pressure difference applied on the internal structures of the hot gas duct was 2.69 MPa on the liner tube and 0.45 MPa on the separating plate. After all tests were completed, the hot gas duct which was used in the tests was disassembled. Inspection revealed that there were no failure and no deformation on the internal structures such as separating plates, insulation layers, a liner tube and a pressure tube.

Keywords : Liner Tube, Pressure Tube, Separating Plate, Insulation Layers, Hot Gas Duct, Depressurization Accident, Depressurization Rate, Slide Joint, Initial Pressure, Pressure Difference

---

\* OKAZAKI Manufacturing Company

## 目 次

1. まえがき .....	1
2. 試験装置の概要 .....	2
3. 減圧速度の検討 .....	16
3.1 オリフィス形状 .....	16
3.2 高圧容器の減圧特性 .....	17
3.3 減圧速度とオリフィス放出量の関係 .....	19
4. 試験方法 .....	24
5. 試験結果 .....	28
5.1 圧力変化及び温度変化の典型例 .....	28
5.2 ライナー管におけるスライドジョイント部開口面積、減圧速度及び 初期圧力の影響 .....	29
5.3 仕切板におけるスライドジョイント部開口面積、減圧速度及び初期 圧力の影響 .....	30
5.4 ヘリウムガス雰囲気と窒素ガス雰囲気と比較 .....	31
5.5 ライナー管に対する座屈荷重の評価 .....	32
5.6 仕切板に対する強度評価 .....	32
5.7 試験研究炉で想定される減圧事故事象との比較 .....	33
6. 使用後検査結果 .....	47
7. 結 論 .....	49
謝 辞 .....	49
参考文献 .....	49
付録 減圧特性解析 .....	50

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Outline of test apparatus .....	2
3. Consideration of depressurization rate .....	16
3.1 Orifice shape .....	16
3.2 Depressurization characteristics of pressure vessel .....	17
3.3 Relation between depressurization rate and orifice exhaust rate .....	19
4. Test procedure .....	24
5. Test results .....	28
5.1 Typical example for pressure change and temperature change .....	28
5.2 Influence for area of open space at slide joint, depressurization rate and initial pressure on liner tube .....	29
5.3 Influence for area of open space at slide joint, depressurization rate and initial pressure on separating plate .....	30
5.4 Comparison between helium gas and nitrogen gas .....	31
5.5 Evaluation of buckling load on liner tube .....	32
5.6 Evaluation of strength on separating plate .....	32
5.7 Comparison with depressurization accident event supposed in HTTR .....	33
6. Inspection results after all tests .....	47
7. Conclusions .....	49
Acknowledgment .....	49
References .....	49
Appendix Analysis of depressurization characteristics .....	50

## 1. ま え が き

高温工学試験研究炉（試験研究炉）では、冷却材として4.0 MPaの高圧ヘリウムガスを使用する。このヘリウムガスは、原子炉内において最高950℃に加熱された後、高温配管により加圧水冷却器、中間熱交換器に輸送される。このような高温高圧のヘリウムガスが流れる高温配管は、従来より使用されてきた単管方式の配管と異なり、耐圧境界である耐圧管と耐熱境界であるライナー管の間に繊維状の断熱材を充てんする内部断熱型の配管が使用される。

また、内部断熱型配管の特徴として、ライナー管には耐圧管とライナー管の熱膨張差を吸収するスライドジョイント部が、断熱材中には透過バイパス流れを防止するための仕切板が一定間隔で設けられている。そこで、試験研究炉で最大の事故事象の一つとして考えられる配管破断による急速減圧事故が発生した場合、ライナー管内のヘリウムガス圧力は急速に減圧するが、断熱材中のヘリウムガス圧力の減圧には、断熱材の透過抵抗及びスライドジョイント部の絞り抵抗により時間遅れが伴う。このため、高温配管内部構造物であるライナー管及び仕切板に、各々半径方向と軸方向に差圧による荷重が加わる。従って、試験研究炉の安全性を検討する上で、急速減圧時におけるライナー管等の構造物の健全性を実証することが必須である。

高温配管供用後試験装置（減圧試験装置）は、このような減圧事故が発生した場合のライナー管及び仕切板に加わる荷重を計測するための試験装置である。本報告では、常温の窒素ガス及びヘリウムガス雰囲気中で実施した試験結果について、高圧容器内初期圧力・スライドジョイント部開口面積・減圧速度をパラメータに整理し、総括的に記述したものである。具体的な内容としては、急速減圧時にライナー管及び仕切板に加わる圧力挙動に対する減圧速度及びスライドジョイント部開口面積の影響、流体の影響、そしてライナー管に対する座屈荷重の評価及び仕切板に対する応力評価についてまとめている。また、本試験では、想定されるすべての減圧事故事象を模擬した条件（減圧速度に限る）を設定し、その時に内部構造物に加わる荷重を検討した。さらに、使用流体の減圧時における圧力分布の相違及び断熱材中の透過率を検討するために簡易モデルによる一次元の非定常減圧特性解析を実施し、試験結果と比較した。

本報告書はこれらの試験結果についてまとめたものである。また、付録に、使用流体による減圧時の圧力分布の相違や断熱材中の透過率を検討するため、非定常減圧特性の解析結果を記述した。

## 2. 試験装置の概要

本試験で使用した高温配管は、Fig. 2.1 に示されるように大型構造物実証試験ループ（HENDEL）の中で加熱器  $H_{32}$  と冷却器  $C_{31}$  の間に設置されていた高温配管であり、試験研究炉で設計されている高温配管と同一の内部構造物を持ち、その内管部とほぼ同一の寸法を有する。

減圧試験装置のフローシートをFig. 2.2に、全体配管図をFig. 2.3に示す。試験装置は、高压容器、放出管、オリフィス、高速エア操作弁及びガスボンベから構成される。試験部である高温配管は高压容器内部に立置きに収められており、高压容器は上部フランジをボルト締めすることにより密閉空間を形成している。配管系は、高压ガスボンベより高压容器内にガスを送り、高压容器内に充てんされたガスを放出する高压ガスラインと、高压ガス放出のためにエア操作弁を開閉する低压ガスラインより構成される。高压容器内のガスの放出速度の調節は、開口面積の異なるオリフィスを設置することにより行われる。オリフィスの構造図をFig. 2.4に示す。また、本試験装置の機器仕様をTable 2.1に示す。

高压容器の断面図をFig. 2.5に示す。試験部にはスライドジョイント部の開口面積を変更できるように、これを模擬した調節装置がライナー管に8箇所設置されている。また、試験体内部の断熱材中に充てんしたガスを、この調節装置の開口部のみより放出させるために、断熱材の両端には盲板を施している。計測系は、試験体内部のガスの絶対圧を2点（P101, P102：以下計測点NoはFig. 2.3のタグNoに対応）、ライナー管に加わる外圧を5点（P001～P005）、耐圧管に加わる内圧を5点（P006～P010）及びライナー管内側のガス温度を5点（T001～T005）で測定している。ライナー管及び耐圧管に加わる差圧は、断熱材中の圧力勾配を検討するため軸方向に沿って測定される。圧力計測用の圧力変換器の構造図をFig. 2.6に示す。差圧用圧力変換器のレンジは、各条件により $10\text{kg}/\text{cm}^2$ ・ $20\text{kg}/\text{cm}^2$ ・ $50\text{kg}/\text{cm}^2$ の3種類を使用した。Table 2.2(1)～(3)に各レンジ毎の計測点一覧表を示す。

計測系のデータ収録システムをFig. 2.7に示す。データの収集は、最小 $20\mu\text{sec}$ のインターバルでデータの取り込みが可能な高速データロガーを使用し、収集したデータは一旦データロガーのバッファに保存される。試験終了後収録したデータは、パーソナルコンピュータに転送されてデータの変換が行われた後、フロッピーディスク及びHENDELのSRM（Sheared Resource Manager）システム上に保存される。



Table 2.1 機器仕様

(1) 高压容器	
	設計圧力: 45kg/cm <sup>2</sup> 設計温度: 60°C 充填流体: ヘリウムガス又は窒素ガス 型式: 立形 内径: φ800mm 高さ: 2270mm 主要材質: SB42
(2) 試験体	
① 耐圧管	外径: φ660.4mm 肉厚: 22mm 長さ: 1820mm 材質: SB42
② ライナー管	外径: φ355.6mm 肉厚: 6mm 長さ: 1756mm 材質: ハステロイX
③ 内部断熱層	a. 断熱材 材質: カオウール 充填密度: 200kg/m <sup>3</sup> (内側2周) 250kg/m <sup>3</sup> (外側1周)
	b. 仕切板 外径: φ616.4mm 内径: φ355.6mm 肉厚: 0.8mm 形状: V型 材質: ハステロイX
	c. 上下盲板 外径: φ660.4mm 内径: φ355.6mm 肉厚: 22mm 設計圧力: 30kg/cm <sup>2</sup> 材質: SS41
	d. 均圧パイプ 口径: 1B 数量: 2本
	e. スライドジョイント調節装置 調節範囲: φ18mm, 7.7mm, 6.5mm, 5.5mm, 3.9mm, 2.7mm, 0.0mmの7種類

Table 2.1 (続 き)

(3) 配管系	
① 高圧ガスライン	a. 高圧ガスライン 設計圧力 : 45kg/cm <sup>2</sup> 設計温度 : 60℃ 材質・口径 : ガス供給系・3/8B 減圧系・3B 減 圧 弁 : 一次系 (150kg/cm <sup>2</sup> ) 二次系 (100kg/cm <sup>2</sup> )
	b. オリフィス 構 造 : Fig.2.6参照 型 式 : 絞り機構によるノズル式 種 類 : 2000L/s, 1600L/s, 1300L/s, 1000L/s, 750L/s, 500L/s, 300L/s, 100L/s, 51.2L/s, 25.6L/sの10種類 (ヘリウム換算流量) 口 径 : 3B 材 質 : SS41
	c. エアー操作弁 型 式 : ボール弁 口 径 : 3B 材 質 : SCPH2 開 速 度 : 約1.5秒 (閉→開)
	d. バルブ 型 式 : ニードル弁 材 質 : SUS316 口径・数量 : 3/8B・6個 1B・1個
	e. 圧力計 型 式 : ブルドン管式 材 質 : 0~70kg/cm <sup>2</sup> G 精 度 : 1.5級 数 量 : 2個
	f. 安全弁 型 式 : ばね式 設計圧力 : 45kg/cm <sup>2</sup> G 公称吹出量 : 1360kg/h (ヘリウムガス時) 3400kg/h (窒素ガス時)

Table 2.1 (続 き)

②低圧ガスライン	a. 低圧ガスライン 設計圧力 : 5kg/cm <sup>2</sup> G 設計温度 : 60℃ 材質・口径 : SUS及びCu・3/8B 減圧弁 : 一次系(150kg/cm <sup>2</sup> G) 二次系(15kg/cm <sup>2</sup> G)
	b. バルブ 型式 : ニードル弁 材質 : SUS316 口径・数量 : 3/8B・2個
	c. 圧力計 型式 : ブルドン管 範囲 : 0~10kg/cm <sup>2</sup> G 精度 : 1.5級 数量 : 1個
(4) 計測系	
①圧力変換器	構造 : Fig.2.7参照 型式 : 歪ゲージ方式 定格圧力 : 50kg/cm <sup>2</sup> G 再現性 : 0.5%以下 非直線性 : 0.5%以下 数量 : 2個
②差圧変換器	構造 : Fig.2.7参照 型式 : 歪ゲージ方式 定格圧力 : 50kg/cm <sup>2</sup> G, 20kg/cm <sup>2</sup> G, 10kg/cm <sup>2</sup> G 再現性 : 0.5%以下 非直線性 : 0.5%以下 応答性 : 400kHz/F.S. 数量 : 各10個 ※ダイヤフラムの左右の圧力差を測定できるように(圧力変換器に背圧が加わるように)圧力変換器のボディーに2mmの空気孔を4箇所設けた。
③温度計	型式 : シース型熱電対 (K型) 階級 : 0.4級 シース径 : φ2.6mm 接点 : 露出形 数量 : 5本
④高速度スキャナー : 日本電気三栄製7V08型	
⑤シグナルコンディショナー : 日本電気三栄製7V15型	

Table 2.2 (1) 計測点一覧表 (圧力変換器10kg/cm<sup>2</sup>の場合)

スキャナー	タグNo	項目	レンジ	7V15レンジ	FUNCTION	製造No
0	P001	差圧	10K	1000	電圧	545909
1	P002	差圧	10K	1000	電圧	545903
2	P003	差圧	10K	1000	電圧	607520
3	P004	差圧	10K	1000	電圧	545905
4	P005	差圧	10K	1000	電圧	545914
5	P006	差圧	10K	1000	電圧	607519
6	P007	差圧	10K	1000	電圧	545913
7	P008	差圧	10K	1000	電圧	545907
8	P009	差圧	10K	1000	電圧	545906
9	P010	差圧	10K	1000	電圧	545916
10	P101	全圧	50K	1000	歪	545601
11	P102	全圧	50K	1000	歪	318713
12	T001	温度	K-TYPE	1000	電圧	
13	T002	温度	K-TYPE	1000	電圧	
14	T003	温度	K-TYPE	1000	電圧	
15	T004	温度	K-TYPE	1000	電圧	
16	T005	温度	K-TYPE	1000	電圧	
17	B V	電圧	5 V	1	電圧	
18 ※	PT01	差圧	10K	1000	電圧	607521
19 ※	PT02	差圧	10K	1000	電圧	607523
20 ※	PT03	差圧	10K	1000	電圧	545915
21 ※	PT04	差圧	10K	1000	電圧	607518

※温度補正用

Table 2.2(2) 計測点一覧表 (圧力変換器20kg/cm<sup>2</sup>の場合)

スキャナー	タグNo	項目	レンジ	7V15レンジ	FUNCTION	製造No
0	P001	差圧	20K	1000	電圧	603921
1	P002	差圧	20K	1000	電圧	706308
2	P003	差圧	20K	1000	電圧	S53623
3	P004	差圧	20K	1000	電圧	706306
4	P005	差圧	20K	1000	電圧	539218
5	P006	差圧	20K	1000	電圧	603925
6	P007	差圧	20K	1000	電圧	S53621
7	P008	差圧	20K	1000	電圧	715501
8	P009	差圧	20K	1000	電圧	706307
9	P010	差圧	20K	1000	電圧	706305
10	P101	全圧	50K	1000	歪	545601
11	P102	全圧	50K	1000	歪	318713
12	T001	温度	K-TYPE	1000	電圧	
13	T002	温度	K-TYPE	1000	電圧	
14	T003	温度	K-TYPE	1000	電圧	
15	T004	温度	K-TYPE	1000	電圧	
16	T005	温度	K-TYPE	1000	電圧	
17	B V	電圧	5 V	1	電圧	
18 ※	PT01	差圧	20K	1000	電圧	715504
19 ※	PT02	差圧	20K	1000	電圧	602164
20 ※	PT03	差圧	20K	1000	電圧	715502
21 ※	PT04	差圧	20K	1000	電圧	715503

※温度補正用

Table 2.2 (3) 計測点一覧表 (圧力変換器50kg/cm<sup>2</sup>の場合)

スキャナー	タグNo	項目	レンジ	7V15レンジ	FUNCTION	製造No
0	P001	差圧	50K	1000	電圧	S55041
1	P002	差圧	50K	1000	電圧	601514
2	P003	差圧	50K	1000	電圧	601510
3	P004	差圧	50K	1000	電圧	546402
4	P005	差圧	50K	1000	電圧	601515
5	P006	差圧	50K	1000	電圧	601516
6	P007	差圧	50K	1000	電圧	601513
7	P008	差圧	50K	1000	電圧	546403
8	P009	差圧	50K	1000	電圧	601511
9	P010	差圧	50K	1000	電圧	601517
10	P101	全圧	50K	1000	歪	545601
11	P102	全圧	50K	1000	歪	318713
12	T001	温度	K-TYPE	1000	電圧	
13	T002	温度	K-TYPE	1000	電圧	
14	T003	温度	K-TYPE	1000	電圧	
15	T004	温度	K-TYPE	1000	電圧	
16	T005	温度	K-TYPE	1000	電圧	
17	B V	電圧	5 V	1	電圧	
18 ※	PT01	差圧	50K	1000	電圧	712314
19 ※	PT02	差圧	50K	1000	電圧	712315
20 ※	PT03	差圧	50K	1000	電圧	712313
21 ※	PT04	差圧	50K	1000	電圧	712316

※温度補正用

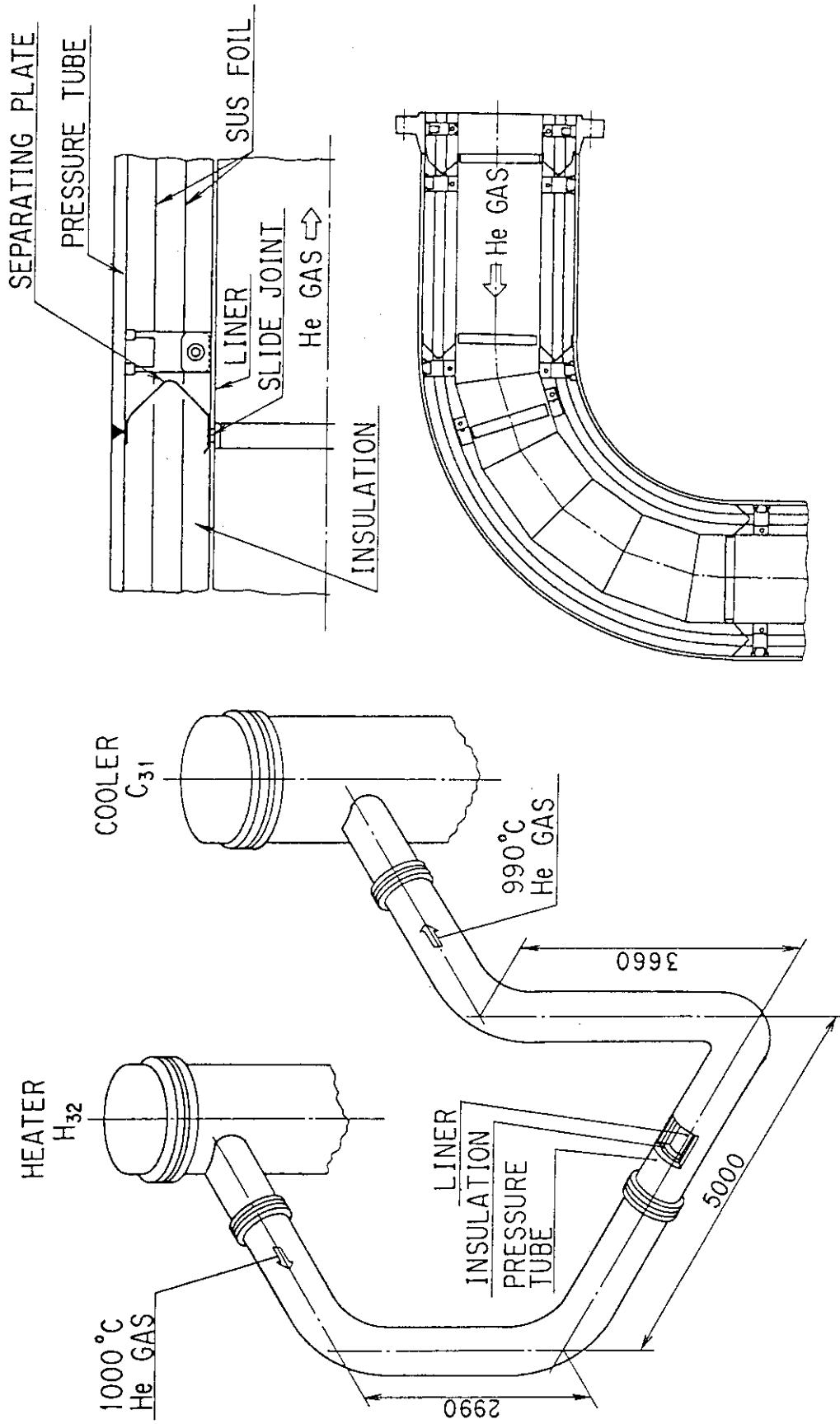
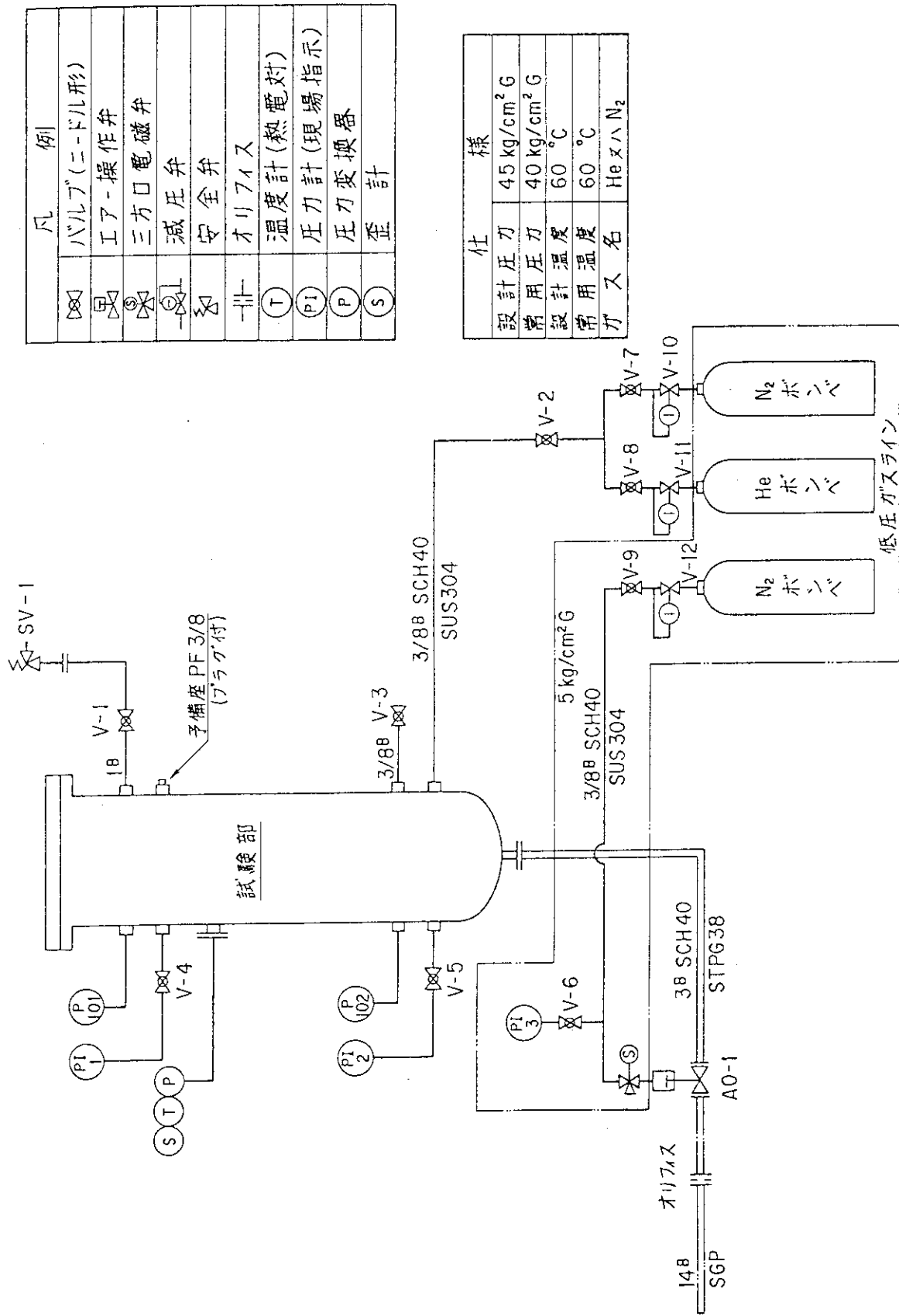


Fig. 2.1 HENDEL高温配管

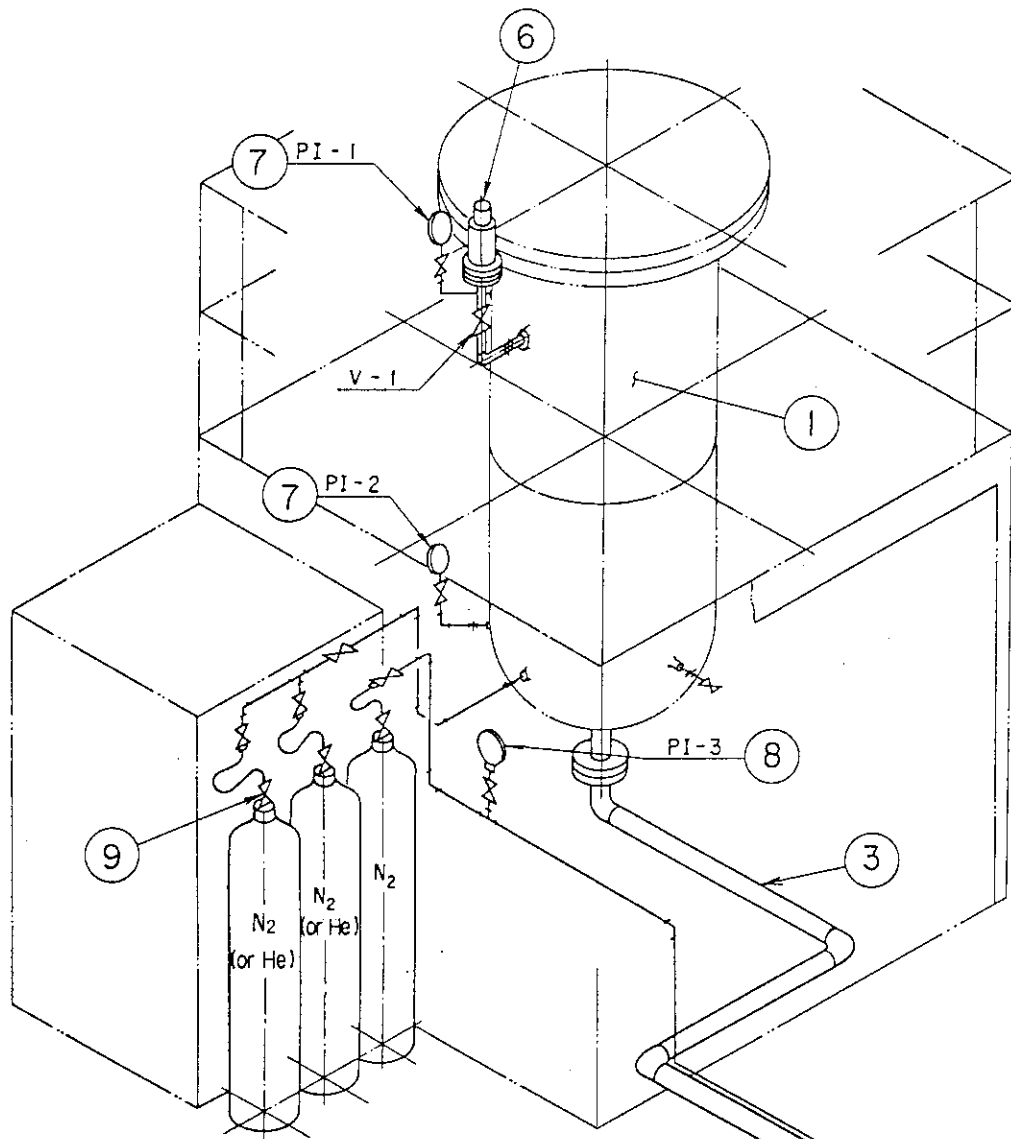


凡 例	
◇	バルブ(ニードル形)
⊠	エア-操作弁
⊗	三方口電磁弁
⊖	減圧弁
⊕	安全弁
— —	オリフイス
(T)	温度計(熱電対)
(PI)	圧力計(現場指示)
(P)	圧力変換器
(S)	歪計

仕 様	
設計圧力	45 kg/cm <sup>2</sup> G
常用圧力	40 kg/cm <sup>2</sup> G
設計温度	60 °C
常用温度	60 °C
ガス名	He x ハ N <sub>2</sub>

Fig. 2.2 減圧試験装置のフローシート





9	Reducing valve	3		
8	Pressure gage	1		PI-3 AE10-131-10K
7	Pressure gage	2		PI-1, PI-2 AE10-131-70K
6	Safety valve	1	SF 45	NS-200JM 25x12x10
5	Air ball valve	1		
4	Orifice	1		
3	Exhaust pipe	1	STPG38	
2	Exhaust pipe	1	SGP	
1	Pressure vessel	1	SB 42	(Test section)
No.	Parts	Number	Materials	Remark

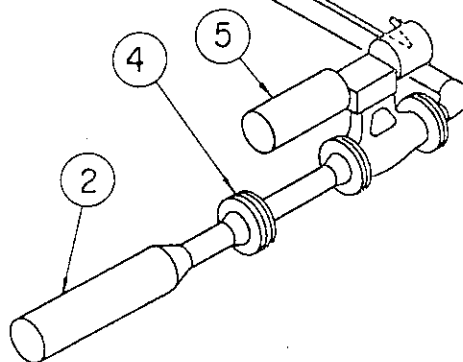
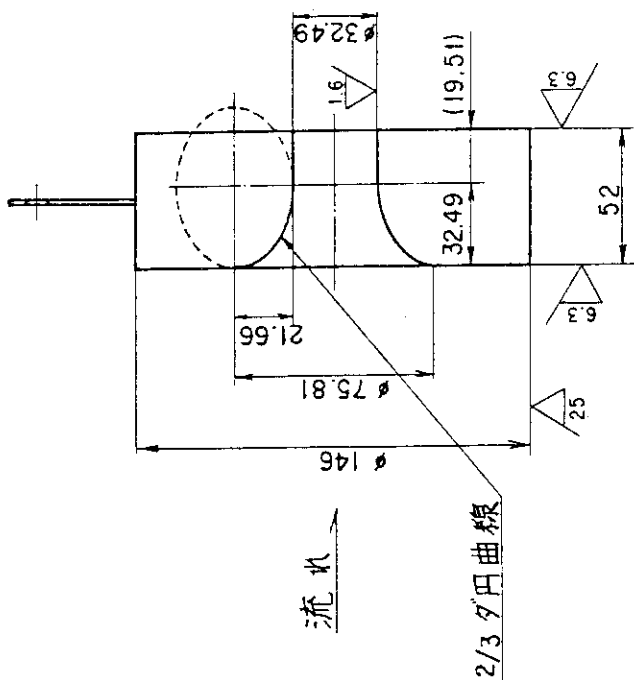
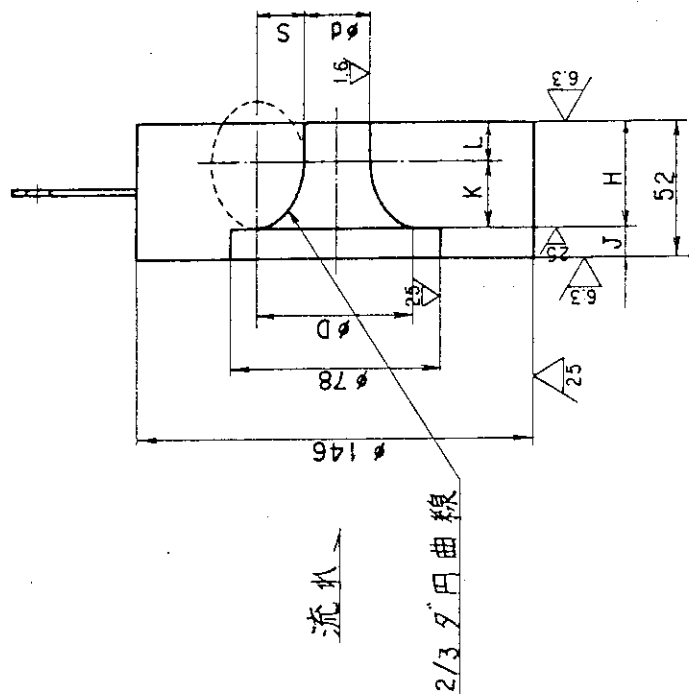


Fig. 2.3 全体配管図



(例) 500ℓタイプ

φ17°	φd	φD	S	H	K	L	J
300ℓ	25.17	58.73	16.78	40.27	25.17	(15.1)	11.73
100ℓ	14.53	33.9	9.69	23.25	14.53	(8.72)	28.75
51.2ℓ	10.4	24.26	6.93	16.64	10.4	(6.24)	35.36
25.6ℓ	7.35	17.15	4.9	11.76	7.35	(4.41)	40.27

Fig. 2.4 オリファイス形状図

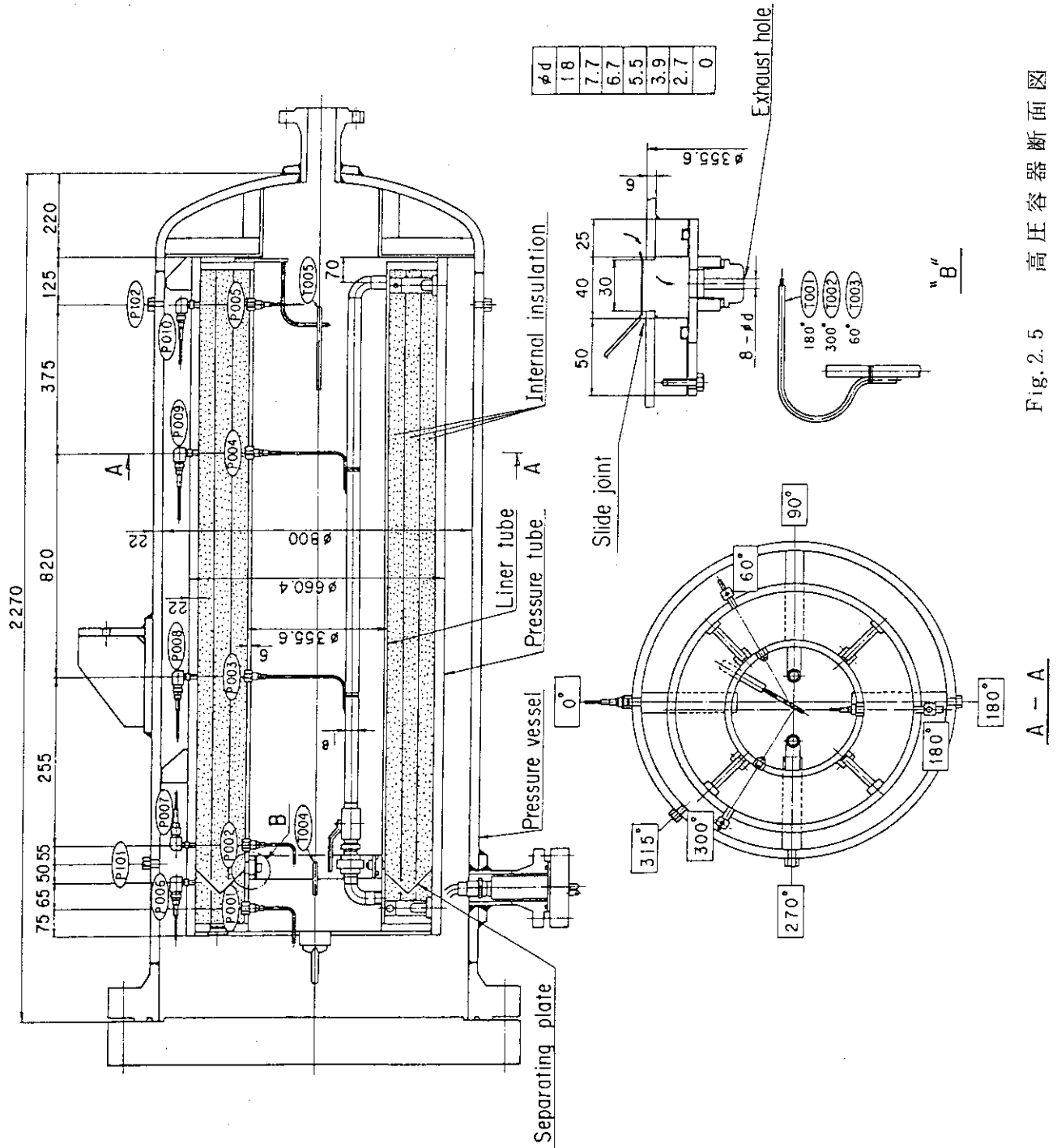
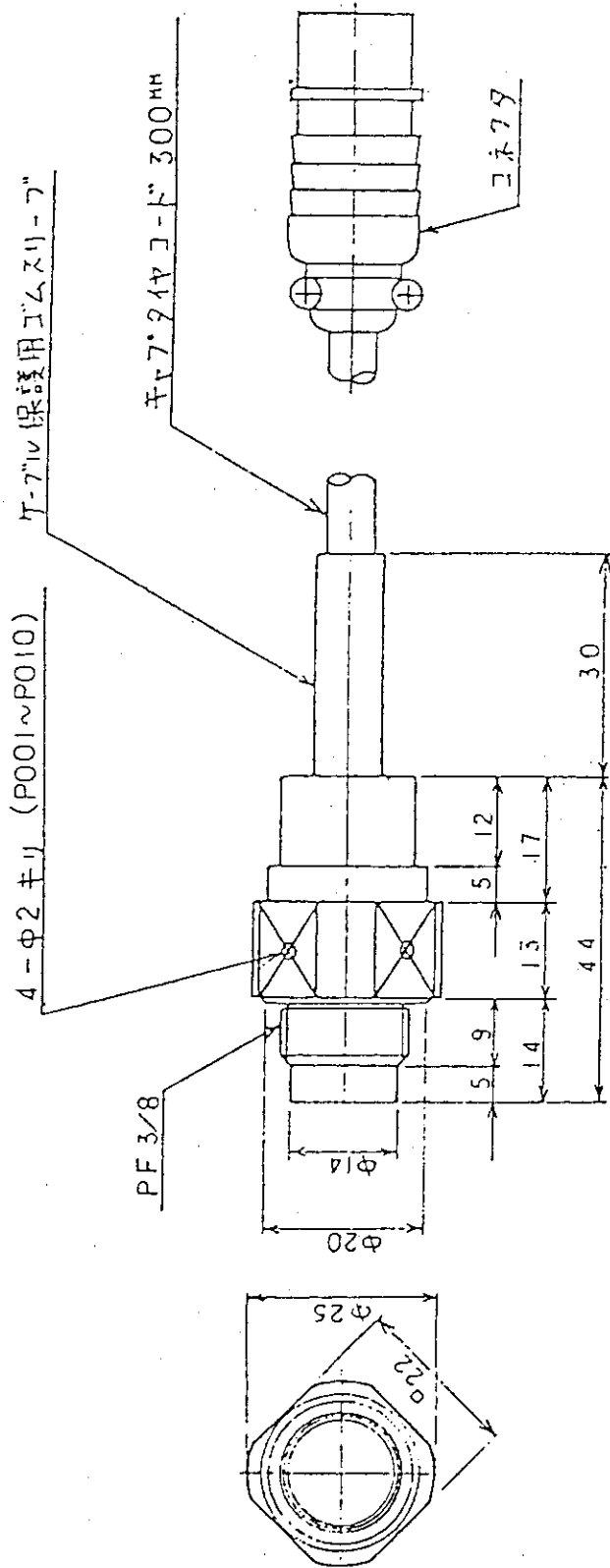


Fig. 2.5 高压容器断面图



差圧用圧力変換器 (P001 ~ P010) 9E02 - P3S - 50

圧力変換器 (P101, P102) 9E02 - P3 - 50

Fig. 2.6 圧力変換器構造図

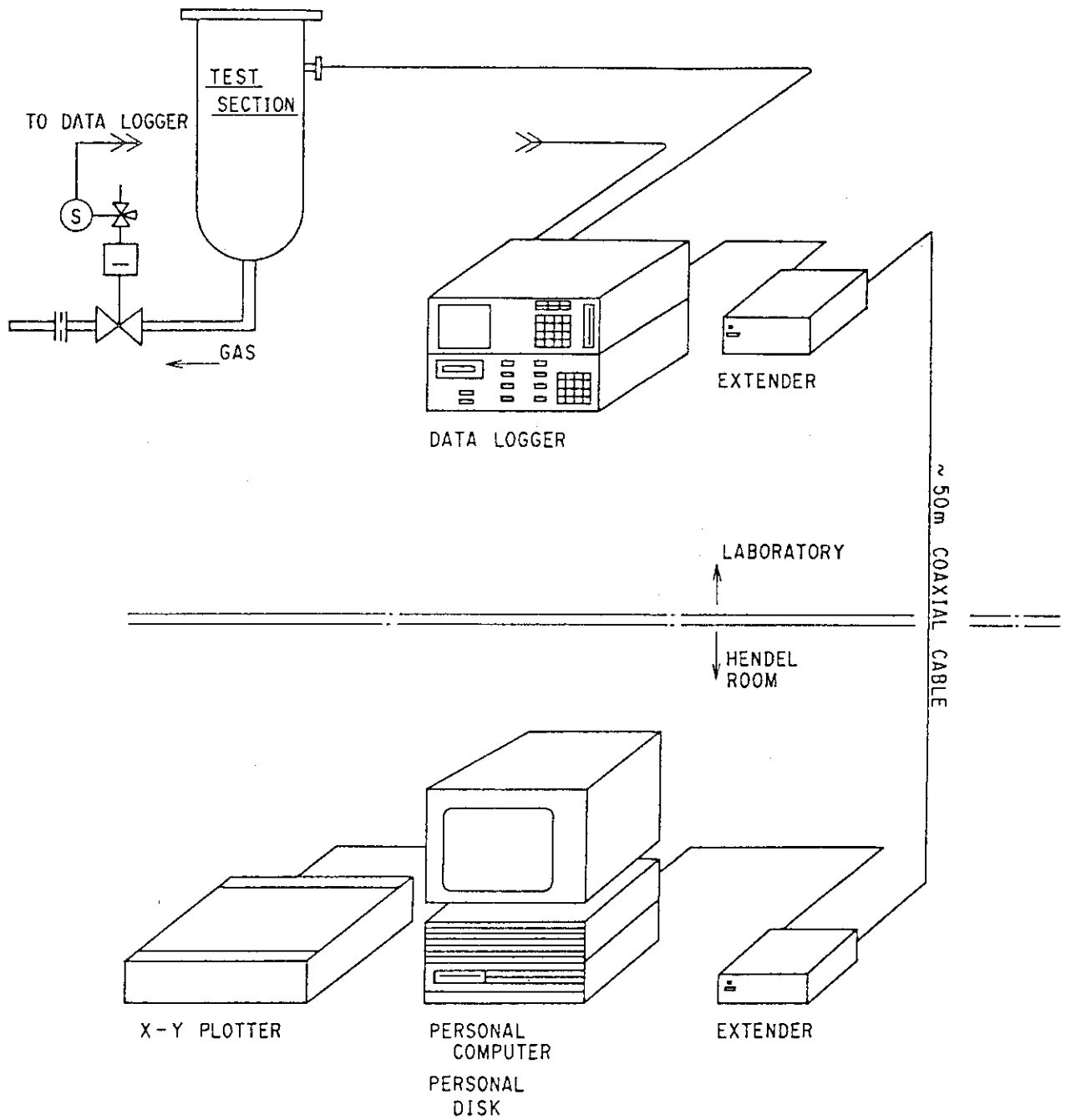


Fig. 2.7 データ収録システム概念図

### 3. 減圧速度の検討

#### 3.1 オリフィス形状

本試験装置の減圧速度は、下流側に設置されたオリフィスの開口面積、すなわちオリフィスにより放出されるガスの放出量により決定される。オリフィスは、JIS Z 8762「絞り機構による流量測定方法」のノズル構造を参考に製作した。その形状図はFig. 2.4に示している。ガス放出量はヘリウムガス換算流量で、2.0, 1.6, 1.3, 1.0, 0.75, 0.5, 0.3, 0.1, 0.0512, 0.0256 m<sup>3</sup>/sの10種類とし、オリフィス開口面積を算出した。

開口面積の計算を以下に示す。計算上の仮定は次の通りである。

- (1) ガスは理想気体とする。
- (2) ガスの減圧は断熱膨張とする。
- (3) オリフィスでのガスの流出速度は音速とする。
- (4) オリフィスより噴出するガスの縮流係数は考慮しない。

ここで、オリフィス入口部のガスの状態を添字1、出口部のガスの状態を添字2で表し、使用した主要変数は次の通りである。

- q : 流速 [m/s]
- Q : 体積流量 [m<sup>3</sup>/s]
- G : 質量流量 [kg/s]
- P : 圧力 [MPa]
- γ : 密度 [kg/cm<sup>3</sup>]
- κ : 比熱比 [-]
- R : ガス定数 [kg・m/K・kg]
- T : 温度 [K]
- A : オリフィス開口面積 [m<sup>2</sup>]
- d : オリフィス径 [m]
- g : 重力加速度 [m/s<sup>2</sup>]
- $\dot{P}$  : 減圧速度 [MPa/s]

オリフィス入口部のガスは、状態方程式より、

$$P_1 = \gamma R T_1 \quad (3.1)$$

オリフィス出口圧力は、臨界圧力に等しいと考えているため、出口部の基準状態式は次式になる。

$$P_2 = P_1 \cdot \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad (3.2)$$

また、断熱膨張であるため出口部のガス密度は、

$$\rho_2 = \rho_1 \cdot \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \quad (3.3)$$

出口流速は音速に等しいため、

$$q_2 = \sqrt{\kappa g P_2 / \rho_2} \quad (3.4)$$

となる。質量流量は、オリフィス入口部と出口部で各々 (3.5) 式、(3.6) 式で表され、連続の式 ( $G_1 = G_2$ ) から、オリフィス開口面積を求めると次式となる。

$$G_1 = Q_1 \rho_1 \quad (3.5)$$

$$G_2 = A q_2 \rho_2 \quad (3.6)$$

$$A = \frac{Q_1 \rho_1}{q_2 \rho_2} = \frac{Q_1 \rho_1}{\sqrt{\kappa g P_2} \rho_2} \quad (3.7)$$

また、オリフィス径は (3.8) 式である。

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (3.8)$$

本試験で使用したヘリウムガス及び窒素ガスの物性値を Table 3.1 に示す。また、オリフィス開口面積  $A$  及びオリフィス径  $d$  と、各々のガスの体積  $Q$  及び質量流量  $G$  の関係を Table 3.2 に示す。

### 3.2 高圧容器の減圧特性

高圧容器の減圧速度とオリフィス放出量の関係を求めるために、計算上の仮定として下記のことを考えた。

- (1) ガスは理想気体とする。
- (2) オリフィスでのガスの状態変化は、断熱膨張とする。
- (3) オリフィスでのガスの流出速度は音速とする。
- (4) オリフィスより噴出するガスの縮流係数は考慮しない。
- (5) 高圧容器からオリフィスまでの配管の圧力損失は無視する。
- (6) 高圧容器内容積は、試験体を考慮して  $1.0 \text{ m}^3$  とする。

高圧容器の減圧速度を検討するためのモデルを Fig. 3.1 に示す。ここで、オリフィス出口部におけるガスの状態を添字  $m$  で表す。また、高圧容器内容積を  $V$  [ $\text{m}^3$ ]、高圧容器内ガス質量を  $M$  [ $\text{kg}$ ] で表す。

気体の状態方程式より、

$$P = \rho R T. \quad (3.9)$$

オリフィスでは基準状態方程式より (3.10) 式～(3.11) 式となる。

$$P_m = P \cdot \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad (3.10)$$

$$\gamma_m = \gamma \cdot \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{1}{\kappa - 1}} \quad (3.11)$$

$$q_m = \sqrt{\kappa g P_m / \gamma_m} \quad (3.12)$$

オリフィス出口部からの単位時間当りの放出量は、

$$\frac{dM}{dt} = -A q_m \gamma_m \quad (3.13)$$

(3.13) 式に (3.12) 式を代入すると、

$$\frac{dM}{dt} = -A \sqrt{\kappa g P_m \gamma_m} \quad (3.14)$$

(3.10) 式と (3.11) 式より、

$$P_m \gamma_m = P \cdot \gamma \cdot \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa - 1}} \quad (3.15)$$

(3.14) 式に、(3.15) 式及び (3.9) 式を代入し、

$$\frac{dM}{dt} = -A \sqrt{\kappa g R T_0 \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa - 1}}} \quad (3.16)$$

(3.16) 式の両辺を  $V_0$  で割り、 $\gamma = M/V_0$  であることより、(3.18) 式が得られる。ただし、 $B$  は (3.17) 式とおく。

$$B = -\frac{A}{V} \sqrt{\kappa g R T_0 \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa - 1}}} \quad (3.17)$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = -B \gamma \quad (3.18)$$

(3.18) 式を積分し、初期状態 ( $t = t_0$ ) での密度を  $\gamma = \gamma_0$ 、高圧容器内圧力を  $P = P_0$  とすると、 $t$  時間後の圧力  $P_t$  は (3.19) 式で表せる。

$$P_t = P_0 \cdot e^{-Bt} \quad (3.19)$$

この理論式に基づいたヘリウムガス雰囲気及び窒素ガス雰囲気の各々の場合における高圧容器内での減圧特性を Fig. 3.2, Fig. 3.3 に示す。



### 3.3 減圧速度とオリフィス放出量の関係

減圧速度には、初期圧力から減圧開始  $t$  時間後の圧力差をその時間で割った平均減圧速度と、減圧開始  $t$  時間後の瞬間の圧力低下率である瞬間減圧速度が考えられる。すなわち、前者は (3.20) 式、後者は (3.21) 式にて定義される。

$$\dot{P} = \frac{P_0 - P_t}{t} \quad (3.20)$$

$$\dot{P} = \left| \left( \frac{d P_t}{d t} \right)_{t=t} \right| \quad (3.21)$$

しかし何れの場合においても減圧開始後の時間  $t$  は、減圧速度を決定するための最も重要な要素となる。試験研究炉の設計における減圧速度の定義は、ガス圧力がリニアに減少すると仮定しているため、減圧開始後の時間  $t$  の選定にかかわらず減圧速度は一定である。たとえば、試験研究炉において最大の減圧事故事象である原子炉主冷却系の配管破断事故の場合、4.0 MPa の圧力に充てんされたヘリウムガスが2秒後に完全に抜けてしまうと考えると、減圧速度を2.0 MPa/s と規定している。

本試験の場合、 $t$  の設定の仕方により減圧速度は大幅に変わってくる。 $t$  の違いによる理論上の減圧速度を平均減圧速度 (3.20) 及び瞬間減圧速度 (3.21) について、Table 3.3 に示す。ここでは  $t$  の差によるバラツキが少ない平均減圧速度 (以下これを減圧速度と呼ぶ) により検討を進めていく。次に Fig. 3.4 は、経過時間  $t$  をパラメータにとり、オリフィス開口面積と窒素ガス及びヘリウムガスとの減圧速度の関係を示す。理論的には  $t$  の設定値が小さいほど減圧速度は大きくなるが、実際の試験では、オリフィスからの放出ガス流速が臨界になるまでの時間遅れが存在し最大にならない。また、減圧開始直後にはデータのばらつきも大きい。そこで本試験ではこれらを考慮し、減圧速度を過大評価することのないように、 $t$  を0.5秒と規定しこの間の平均減圧速度を算出した。

Table 3.4 にヘリウムガス及び窒素ガスの各々の場合におけるオリフィス径及びオリフィス開口面積と減圧速度の関係を示す。

Table 3.1 使用した物性値

項 目	ガスの種類	
	He	N <sub>2</sub>
入口圧力 P <sub>0</sub> [kg/cm <sup>2</sup> ]	45	45
入口温度 T <sub>0</sub> [ K ]	333	333
比 熱 比 K [ - ]	1.66	1.40
ガス定数 R [kg・m/k・kg]	211.9	30.26

Table 3.2 オリフィス開口面積（径）と体積流量及び質量流量の関係

オリフィス開口面積(mm <sup>2</sup> ) (オリフィス径 (mm))	体積流量 (l/s)		質量流量 (kg/s)	
	ヘリウムガス	窒素ガス	ヘリウムガス	窒素ガス
165 (14.53)	100	35.7	0.638	1.585
487 (25.17)	300	107	1.914	4.775
829 (32.49)	500	178	3.190	7.965
1243 (39.78)	750	268	4.785	11.943
1658 (45.95)	1000	357	6.380	15.930
2156 (52.44)	1300	464	8.294	20.715
2653 (58.09)	1600	571	10.208	25.491
3316 (65.02)	2000	714	12.760	31.862

Table 3.3 窒素ガスの場合の平均減圧速度と瞬間減圧速度の比較表

オリフィス開口面積 ( $\times 10^{-4} \text{ m}^2$ )	平均減圧速度 (MPa/s)			瞬間減圧速度 (MPa/s)		
	t = 0.5 s	t = 1.0 s	t = 1.5 s	t = 0.0 s	t = 0.5 s	t = 1.0 s
1.65	0.14	0.14	0.13	0.14	0.14	0.13
4.97	0.41	0.40	0.38	0.42	0.40	0.37
8.29	0.67	0.64	0.59	0.70	0.64	0.59
12.43	0.98	0.92	0.81	1.05	0.92	0.80
16.58	1.28	1.18	1.00	1.40	1.17	0.98
21.56	1.62	1.46	1.19	1.82	1.44	1.14
26.53	1.95	1.71	1.33	2.24	1.68	1.26
33.16	2.35	2.00	1.49	2.88	1.96	1.37

Table 3.4 オリフィス開口面積と減圧速度の関係

オリフィス開口面積 ( $\text{mm}^2$ )	オリフィス径 ( $\text{mm}$ )	減圧速度 [MPa/s]	
		ヘリウムガス	窒素ガス
165	14.53	0.38	0.14
497	25.17	1.09	0.41
829	32.49	1.73	0.67
1243	39.78	2.45	0.98
1658	45.95	3.08	1.28
2156	52.44	3.75	1.62
2653	58.09	4.32	1.95
3316	65.02	4.96	2.35

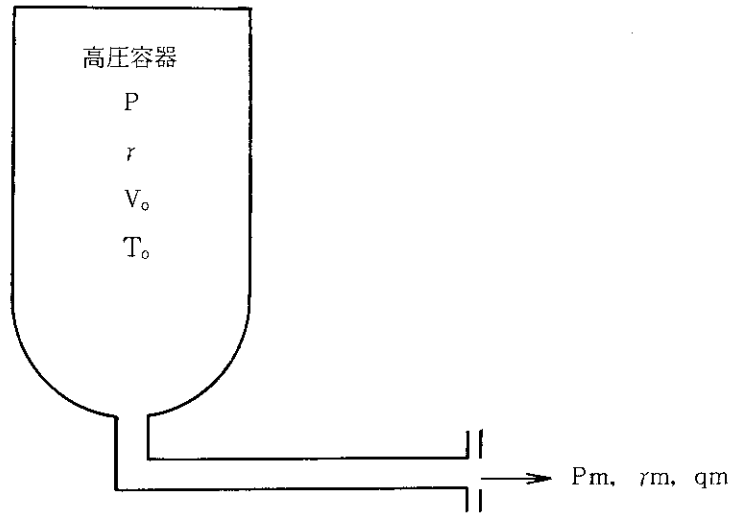


Fig. 3.1 高圧容器の減圧モデル

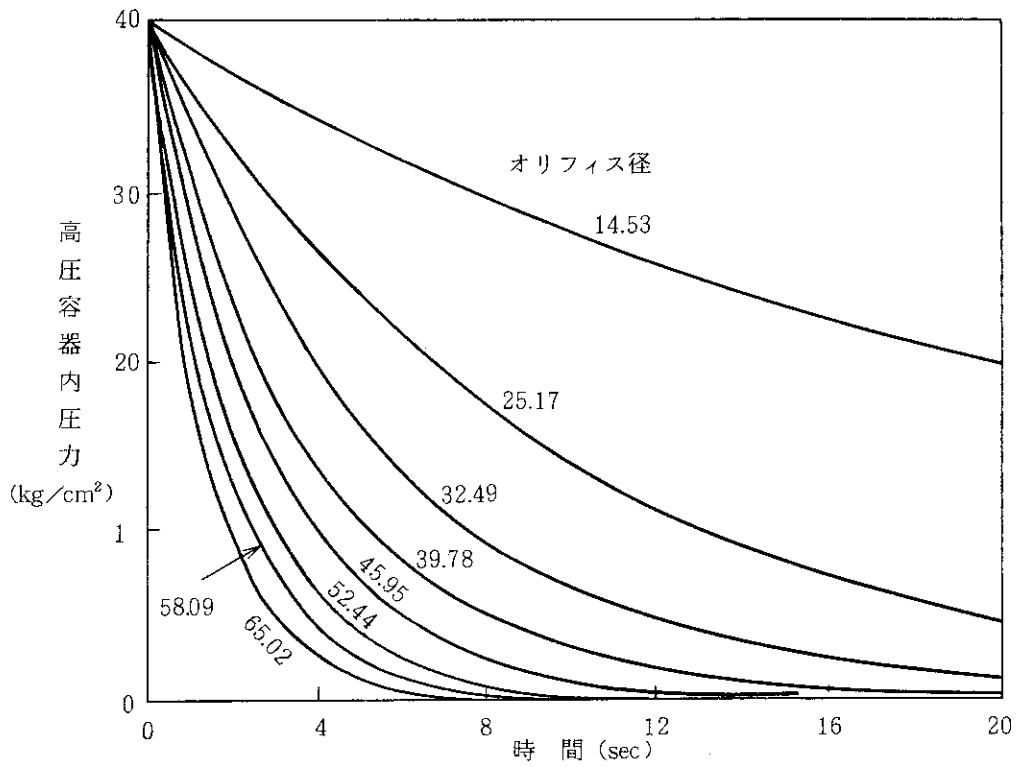


Fig. 3.2 高圧容器の減圧特性 (窒素ガス)

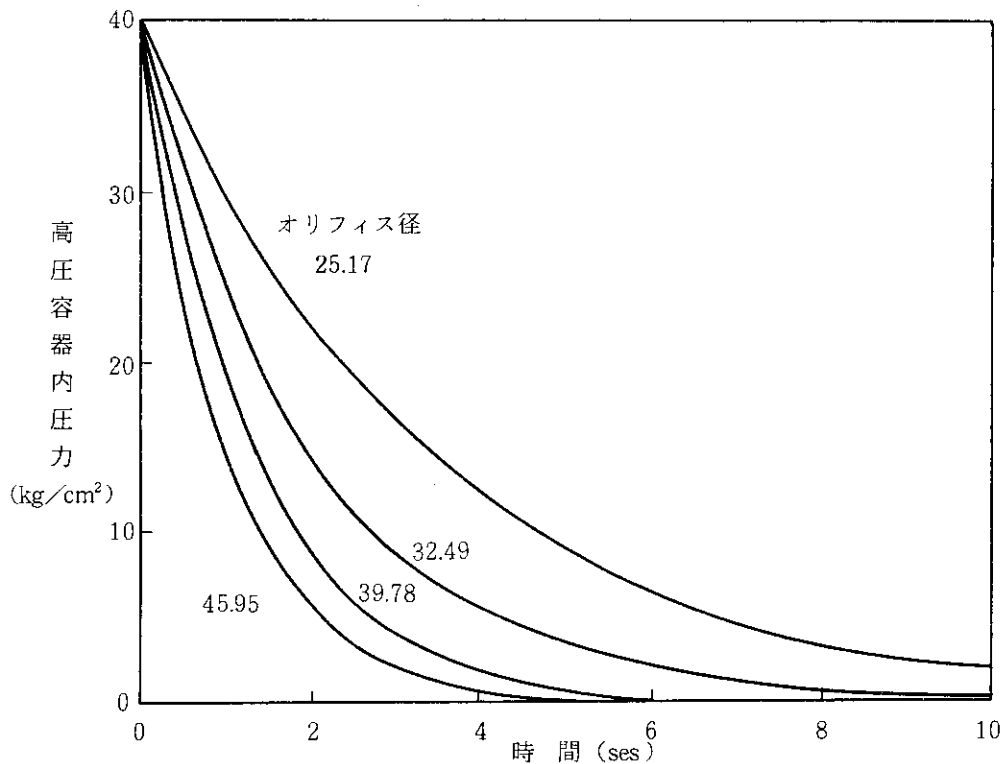


Fig. 3.3 高圧容器の減圧特性（ヘリウムガス）

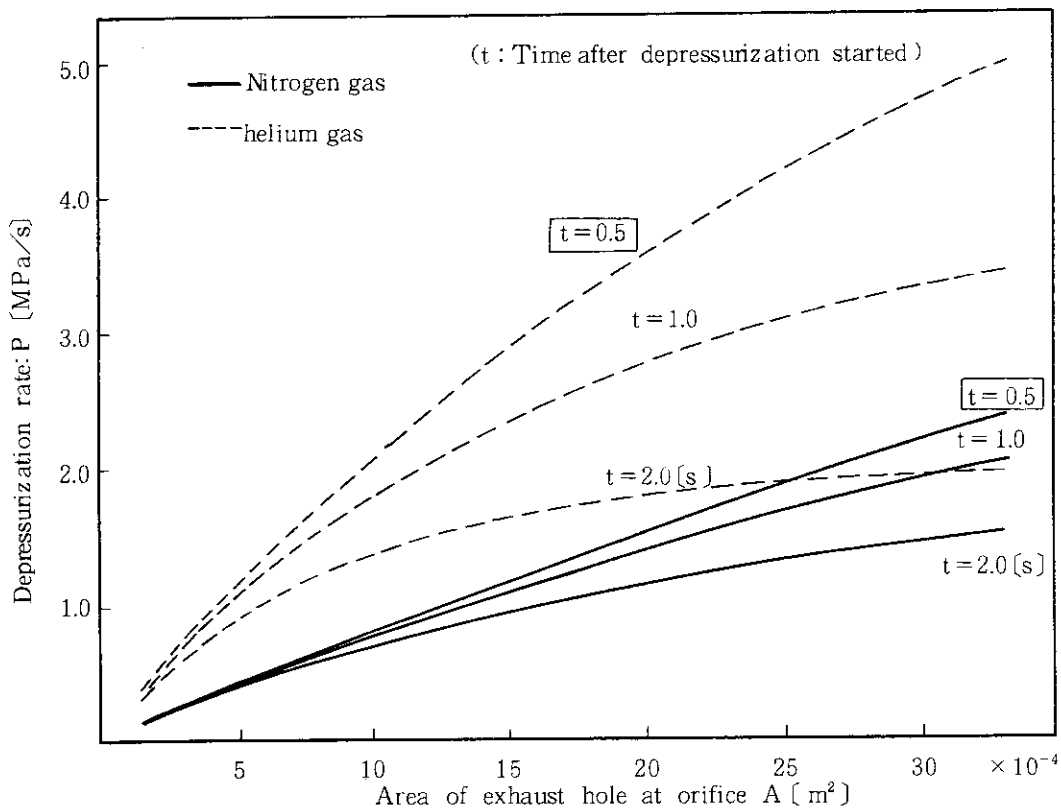


Fig. 3.4 経過時間 t と減圧速度の関係

## 4. 試 験 方 法

本試験は、窒素ガス又はヘリウムガスをガスポンベから高圧容器内に所定の圧力まで充てんした後、試験部とオリフィス間に設置した高速のエア操作弁を開放することにより、ガスを放出させる。この高速エア操作弁は、低圧ガスライン内にある電磁弁を開にすることでガスが供給され開放する構造となっている。

ガスの放出方法としては、充てんしたガスを一挙に放出する場合と、数回に分けて放出する場合が考えられる。本試験では、主として高圧容器内に供給するガス容量及びそれに要する時間を考慮して、後者の方法を用いた。すなわち、高圧容器内部圧力を最初 4.0 MPa または 2.0 MPa に充てんした場合、ガス放出後 2.0 MPa、1.0 MPa まで圧力が下がった時点で、一旦減圧をやめ定常状態になった後、再びガスの放出を行い実験を再開した。ただ、ライナー管及び耐圧管に 2.0 MPa 以上の荷重が加わるような厳しい条件下では、前者の 4.0 MPa に充てんしたガスを一挙に放出する方法を用いた。

今回実施した試験条件と試験No一覧表をガス別に Table 4. 1, Table 4. 2 に示す。試験パラメータとしては、ガス放出前に高圧容器内に充てんするガスの初期圧力、減圧速度、スライドジョイント調節装置の開口面積を用いており、全部で、ヘリウムガスの場合 27 ケース、窒素ガスの場合 93 ケースの試験を実施した。初期圧力は主として 4.0 MPa の場合を中心に、2.0 MPa、1.0 MPa で行った。減圧速度は、エア操作弁の下流側にあるオリフィスの開口面積により決まる単位時間あたりのガス放出量であり、試験研究炉で想定される各種の減圧事故を模擬できるようにオリフィス径を選定した。Table 4. 3 に試験研究炉で想定される減圧事故と減圧速度の関係を示す。スライドジョイント調節装置は、耐圧管とライナー管の熱膨張差を吸収するスライドジョイント部を模擬したもので、その開口面積を変更できるように、最小  $\phi$  3.9 mm、最大  $\phi$  18.0 mm の穴が開いたプラグをライナー管に 8 箇所取り付けられるようになっている。なお、実際に HENDEL に取り付けられたスライドジョイント部の開口面積は、測定により約 1250 mm<sup>2</sup> である事が知られている。試験条件を Table 4. 4 に示す。

Table 4.1 試験No.一覧表 (使用流体：窒素)

※2. 開口面積(mm <sup>2</sup> )		2036	1018	509	325	186	95	46.6	11.9	
※1. オリフィス (l/s)										
100	初期圧力 (MPa)	4	330	340	350		370			
		2	331	341	351		371			
		1	332	342	352		372			
300	初期圧力 (MPa)	4	430	440	450	460	470			
		2	431	441	451	461	471			
		1	432	442	452	462	472			
500	初期圧力 (MPa)	4	530	540	550	560	570			
		2	531	541	551	561	571			
		1	532	542	552	562	572			
750	初期圧力 (MPa)	4	630	640	650	660				
		2	631	641	651	661				
		1	632	642	652	662				
1000	初期圧力 (MPa)	4	730	740	750					
		2	731	741	751					
		1	732	742	752					
1300	初期圧力 (MPa)	4	835				870	880	890	
		2	836							
		1	837							
1600	初期圧力 (MPa)	4	930	940	950	967	970	980		
		2	931	941	951					
		1	932	942	952					
2000	初期圧力 (MPa)	4	033	040	050	060	070	080	091	095
		2	034	041						
		1	035	043						
備 考										

※1：ヘリウムガスの放出流量

※2：スライドジョイント部の開口面積

Table 4.2 試験No.一覧表 (使用流体:ヘリウム)

※2.開口面積(mm <sup>2</sup> )		2036	1018	509	325	186	
※1. オリフィス (l/s)							
100	初期圧力 (MPa)	4					
		2					
		1					
300	初期圧力 (MPa)	4	400	406			
		2	401	407			
		1	402	408			
500	初期圧力 (MPa)	4	500	506	515	518	521
		2	504	507	516	519	522
		1	505	508	517	520	523
750	初期圧力 (MPa)	4		600			
		2		601			
		1		602			
1000	初期圧力 (MPa)	4		700			
		2		701			
		1		702			
備 考							

※1:ヘリウムガスの放出流量

※2:スライドジョイント部の開口面積



Table 4.3 試験研究炉で想定される減圧事故事象と  
その時の減圧事故

(減圧事故事象)	(減圧速度)
• 原子炉主冷却径配管の大破断	2.00 MPa/s
• 2次系の冷却材喪失	1.30 MPa/s
• 原子炉冷却系の大口徑配管破断クラック	0.15 MPa/s
• 2次系の冷却系配管破断	13.3 kPa/s
• 冷却材強制循環機1台トリップ	3.30 kPa/s
• 誤動作による単一制御棒の部分的引き抜き	3.30 kPa/s
• 所外電源喪失	0.12 kPa/s

Table 4.4 試験条件

• 初期圧力	: 1.0 ~ 4.0 MPa
• 減圧速度	
窒素ガス	: 0.14 ~ 2.35 MPa/s
ヘリウムガス	: 1.09 ~ 3.08 MPa/s
• スライドジョイント部開口面積	: 11.9 ~ 2036 mm <sup>2</sup>

## 5. 試 験 結 果

### 5.1 圧力変化及び温度変化の典型例

窒素ガス雰囲気中における圧力変化と温度変化の典型例を示す。

ライナー管及び耐圧管に発生する差圧と時間の関係を Fig. 5.1, Fig. 5.2 に示す。これは、初期圧力 4.0 MPa, 減圧速度 0.67 MPa/s, スライドジョイント部開口面積 1018 mm<sup>2</sup> の場合 (試験 No. 540) であり、高圧容器内の圧力が 2.0 MPa に減圧した時点で、ガスの放出を強制的に中止している。この場合、ライナー管では、スライドジョイント部より最も遠い計測点位置 (P005) で最大の差圧 0.42 MPa が発生した。耐圧管でもこれと同様な傾向を示した。すなわち、耐圧管では、計測点位置 P010 で最大差圧 0.41 MPa となった。この原因は、断熱材の透過抵抗及びスライドジョイント部の絞り抵抗により、主流のガス圧力変化に対し、断熱材中のガス圧力が時間遅れを生じながら減圧するためである。図中で最大差圧後の変曲点 (差圧の減少率が再び大きくなる時間) は、エア操作弁を閉にし高圧容器内の減圧を強制的に止めた時点に対応する。

Fig. 5.3 は、Fig. 5.1 に対して減圧速度が 0.41 MPa/s の場合 (試験 No. 440), Fig. 5.4 は 1.28 MPa/s (試験 No. 740) の場合のライナー管に発生する差圧と時間の関係を示す。また、Fig. 5.5 及び Fig. 5.6 は、スライドジョイント部開口面積が 325 mm<sup>2</sup> (試験 No. 560) と 2036 mm<sup>2</sup> (試験 No. 530) の場合の関係である。いずれも高圧容器内の圧力を 4.0 MPa から 2.0 MPa まで減圧した場合である。減圧速度を小さくすると、差圧がピークに到達する時間が短くなり、一方減圧するのに要する時間は長くなった。また、スライドジョイント部開口面積を小さくすると、差圧がピークに到達する時間は長く、減圧に要する時間はほとんど変わらないことが分かった。

これは、減圧に要する時間が減圧速度すなわちオリフィスの開口面積だけで決まるからである。また、差圧がピークに到達する時間に関しては次の理由が考えられる。断熱材中からスライドジョイント部を通して放出されるガスはスライドジョイント部分で臨界流速となっており、一方高圧容器からオリフィスを通して放出されるガスもオリフィス部分で臨界流速となっている。この場合、スライドジョイント部開口面積に対する断熱材中の容量とオリフィス開口面積に対する高圧容器の容量により、各々臨界となっている時間が違う。一般に、同一の減圧速度の場合、スライドジョイント部開口面積が小さいほど断熱材中に残っているガスの容量が大きく、このため差圧がピークに到達する時間は長くなる。一方スライドジョイント部開口面積が一定であれば、減圧速度が大きいほど高圧容器内のガス容量は小さくなり、すなわちスライドジョイント部における臨界時間が長くなることになり、従って差圧がピークに到達する時間は長くなる。

Fig. 5.7 及び Fig. 5.8 は、減圧速度及びスライドジョイント部開口面積に関しては Fig. 5.1 と同一条件で、初期圧力を各々 2.0 MPa と 1.0 MPa に変えた場合の関係である。減圧速度やス

ライドジョイント部開口面積を変更した場合ほど顕著ではないが、初期圧力が小さくなるにつれ差圧ピーク到達時間は長くなることが分かった。

次に温度変化の典型例をFig. 5.9に示す。減圧速度等のパラメータ条件はFig. 5.1, Fig. 5.2と同じである。温度は、ライナー管内側のガス温度を直接計測しており、高圧容器内の減圧と共に、断熱膨張により急激に低下した。試験No.540では、最大約19℃低下した。しかし、高圧容器内の減圧を止めるとガス温度は緩やかに上昇し始めた。図中では、ガス温度の最小値がエア操作弁を閉にした時点と対応した。

Fig. 5.10は、試験No.540における高圧容器内絶対圧力と時間との関係を示す。圧力は、エア操作弁の時間遅れにより試験開始後約1.5秒後から降下し始めた。

## 5.2 ライナー管におけるライドジョイント部開口面積、減圧速度及び初期圧力の影響

窒素ガス雰囲気中でライナー管に発生する差圧について検討する。

前節で記述したように、ライナー管に加わる差圧の中で最大の差圧が発生する位置は、ライドジョイント部より最も離れた計測点位置すなわち断熱材中の透過抵抗の影響を最も受ける位置P005である。また、ライナー管と耐圧管に発生する最大差圧の大きさは同程度であるが、耐圧管の肉厚22mmに比してライナー管のそれは6mmであるため、当然ライナー管の方が急速減圧時に厳しい状態にさらされることになる。そこで、ここではライナー管の差圧計測点位置P005を対象を絞り考察を進めていく。

Fig. 5.11は減圧速度をパラメータにとり、ライナー管に発生する差圧とライドジョイント部開口面積の関係を示す。初期圧力は4.0MPaである。図からも明らかなように、ライナー管に発生する差圧はライドジョイント部開口面積が小さくなるにつれ増大することがわかった。これはライドジョイント部開口面積が小さくなる程、ライドジョイント部における絞り抵抗の影響がより顕著に現れてくるためである。本試験では、ライドジョイント部開口面積が約1000mm<sup>2</sup>を境界にし、それより小さくなるに従いライナー管に発生する差圧は急激に増加した。しかし、1000mm<sup>2</sup>より大きくなると、ライナー管に発生する差圧の減少率は緩やかになりほぼ一定となった。これは、本試験で使用したHENDEL高温配管のライドジョイント平均開口面積が1257mm<sup>2</sup>（図中において半線で示す）であるため、それより開口面積の大きいライドジョイント部を使用してもその絞り抵抗の影響が現れてこないためである。また、この点を考慮すれば1000mm<sup>2</sup>以下ではライドジョイント部の絞り抵抗の影響が大きく、1000mm<sup>2</sup>以上では断熱材中の透過抵抗の影響が大きいと考えられる。

本減圧試験装置を用いた全試験の中で、ライドジョイント部の開口面積95mm<sup>2</sup>、減圧速度1.62MPa/sの場合に、ライナー管に発生する差圧は最大となり、その値は2.69MPaであった。その後、減圧速度を大きくしたり、ライドジョイント部開口面積を小さくすることにより、より厳しい条件で数回試験を実施したにもかかわらず2.69MPa以上の差圧は発生せず、2.0MPa～2.6MPaの間で飽和した。これは、急速減圧時に断熱膨張により高圧容器内の温度が急激に減少し、圧力変換器の使用温度範囲をはるかに越えたため正常な応答を示さなかったか、あるいは、高温配管試験部に亀裂等が生じたためと考えられる。このため、試験終了後試験部の目

視検査を行ったが異常のないことが分かったため後者でないことが確認できた。また、差圧が小刻みに厳しく振動していることから前者の場合であることが推定できる。この一例をFig. 5.12に示す。Fig. 5.12は、減圧速度 2.35 MPa/s, スライドジョイント部開口面積 46.6 mm<sup>2</sup> の場合である。

Fig. 5.13は、高压容器内に充てんした初期圧力をパラメータにとり、ライナー管に発生する差圧とスライドジョイント部開口面積の関係を示したものである。減圧速度は0.67 MPa/sである。ライナー管に発生する差圧は、初期圧力が大きくスライドジョイント部開口面積が小さくなる程増大した。また図より、初期圧力4.0 MPaで発生する差圧と初期圧力1.0 MPaで発生する差圧の比を、スライドジョイント部開口面積毎に取り比較してみると、スライドジョイント部開口面積 325 mm<sup>2</sup>で3.0倍、2036 mm<sup>2</sup>で2.2倍となった。すなわち、スライドジョイント部開口面積が小さくなるにつれて、断熱材中のガス残存量が多くなり、ライナー管に発生する差圧は初期圧力の比に限りなく近づく（ここでは、4.0倍）と考えられる。

ライナー管に発生する差圧と減圧速度の関係をFig. 5.14に示す。初期圧力は4.0 MPaである。ライナー管に発生する差圧は、減圧速度に正比例して増加することが分かる。

### 5.3 仕切板におけるスライドジョイント部開口面積、減圧速度及び初期圧力の影響

窒素ガス雰囲気中で仕切板に発生する差圧について検討する。

仕切板に発生する差圧を計測点位置P001とP002で測定される差圧の差と考え、横軸にスライドジョイント部開口面積を取り整理したのがFig. 5.15である。減圧速度をパラメータとし、初期圧力は4.0 MPaである。計測点位置P001で測定される差圧は、スライドジョイント部の絞り抵抗と断熱材中の透過抵抗により発生するためFig. 5.1で示した計測点位置P005で測定される差圧と同様な曲線を描く。一方計測点位置P002は、スライドジョイント部近辺に位置するため、P002で測定される差圧は断熱材中の透過抵抗が無視でき、ほとんどスライドジョイント部の絞り抵抗のみの影響を受けると考えられる。

仕切板に発生する差圧は、ライナー管に発生する差圧の場合と反対に、スライドジョイント部の絞り抵抗の影響を受ける1000 mm<sup>2</sup>以下の開口面積では、開口面積が大きくなるにつれ増加するが、一方断熱材中の透過抵抗が主因となる1000 mm<sup>2</sup>以上の開口面積では、開口面積の大きさによらず一定となった。

Fig. 5.16は、初期圧力をパラメータに取り、仕切板に加わる差圧とスライドジョイント部開口面積の関係を示したものである。減圧速度は、0.67 MPa/sである。仕切板に発生する差圧は、スライドジョイント部開口面積が小さい場合、高压容器内の初期圧力とはほとんど無関係になることが分かった。このことは、ライナー管に発生する差圧と反対の現象である。

Fig. 5.17は、仕切板に発生する差圧と減圧速度の関係を示す。初期圧力は4.0 MPaである。ライナー管に発生する差圧と同様に、減圧速度が大きくなるにつれ仕切板に発生する差圧は増加しているが、減圧速度が2.0 MPa以上の大きさではその影響が比較的現れないことが分かった。

本減圧試験装置で窒素ガス雰囲気中における全試験の中で、初期圧力4.0 MPa、減圧速度

2.35 MPa/sにおいて、スライドジョイント部開口面積 2036 mm<sup>2</sup> の場合に仕切板に発生する差圧は最大となり、その値は 0.282 MPaであった。

#### 5.4 ヘリウムガス雰囲気と窒素ガス雰囲気との比較

本節では、ヘリウムガス雰囲気で行った試験結果について記述し、併せて窒素ガス雰囲気との比較を行う。

Fig. 5.18と Fig. 5.19は、急速減圧時にヘリウムガス雰囲気においてライナー管及び耐圧管に発生する内圧・外圧を経過時間と共に表したものである。減圧速度 1.73 MPa/s、スライドジョイント部開口面積 1018 mm<sup>2</sup>、高圧容器内初期圧力 4.0 MPaである。ヘリウムガスは窒素ガスに比べて、分子の大きさが小さく、密度が7分の1と非常に軽いため、断熱材中を抜ける速度が早い。従って、発生する差圧のピークは鋭角に現れた。

Fig. 5.11と同様に、減圧速度をパラメータにとり、スライドジョイント部開口面積とライナー管に発生する差圧との関係を、ヘリウムガス雰囲気において示したのが Fig. 5.20である。初期圧力は 4.0 MPaである。Fig. 5.11や Fig. 5.20からも明らかなように、ヘリウムガス雰囲気においてライナー管に発生する差圧は、減圧速度やスライドジョイント部開口面積に関して、窒素ガス雰囲気の場合と同じ傾向を示した。しかし、Fig. 5.11と Fig. 5.20を比較すると次の2点で差異が見られた。すなわち、一つは同一の減圧速度やスライドジョイント部開口面積では、ヘリウムガス雰囲気においてライナー管に発生する差圧は、窒素ガス雰囲気の場合に比べて20～40%小さいことである。例えば、スライドジョイント部開口面積が 1018 mm<sup>2</sup>、減圧速度が 1.95 MPa/s では、窒素ガス雰囲気中でライナー管に発生する差圧は 1.39 MPaであるのに対し、ヘリウムガス雰囲気中では 1.05 MPaであると推定できる。なお Fig. 5.11と Fig. 5.20は、減圧速度が各々異なり絶対的な比較が難しいため、比較しやすいように窒素ガス雰囲気の減圧速度をヘリウムガス雰囲気中での減圧速度に合わせ、その時のライナー管に発生する差圧を試験結果より類推し整理したのが Fig. 5.21である。図中の点線部分がヘリウムガス雰囲気中の場合である。もう一つの異なる点は、ライナー管に発生する差圧が、窒素ガス雰囲気中ではスライドジョイント部開口面積が約 1000 mm<sup>2</sup> 以下になると急激に増大したのに対し、ヘリウムガス雰囲気中では約 300 mm<sup>2</sup> まで緩やかに増えている点である。これはヘリウムガス雰囲気中の方が、窒素ガス雰囲気中に比べて、スライドジョイント部の絞り抵抗の影響が小さいことを示している。

次に、ヘリウムガス雰囲気中での仕切板に発生する差圧について検討する。Fig. 5.22は、窒素ガス雰囲気中での仕切板に発生する差圧を表した Fig. 5.15に、ヘリウムガス雰囲気中での試験結果を加えたものである。Fig. 5.22に示されるように、同じ条件のもとで仕切板に発生する差圧は、ヘリウムガス雰囲気中の方が窒素ガス雰囲気中に比べて大きいことが分かった。これは、ライナー管に発生する差圧の場合と反対の現象である。例えば、スライドジョイント部開口面積が 1018 mm<sup>2</sup> の場合、仕切板に発生する差圧は、窒素ガス雰囲気中において減圧速度 2.35 MPa/s で 0.265 MPaであるのに対し、ヘリウムガス雰囲気中においては減圧速度 1.73 MPa/s で 0.303 MPaであった。

### 5.5 ライナー管に対する座屈荷重の評価

急速減圧時における高温配管内部構造物の健全性を検討するために、ライナー管に対する座屈荷重の評価を実施した。この場合、ライナー管に加わる外圧は、瞬時に変化し軸方向に圧力分布を持つが、ここでは静的に荷重が加わりその圧力分布は一定として評価を行った。ASME Sec. III NBでは、薄肉円筒の座屈荷重に対する評価を次式で行っている。

$$P_{cr} = K E (t/d)^3 \quad (5.1)$$

- $P_{cr}$  : 許容外圧 [MPa]
- $K$  : 座屈強度係数 [ - ]
- $E$  : ヤング率 [MPa]
- $t$  : 円筒の肉厚 [mm]
- $d$  : 円筒の外径 [mm]

ここで座屈強度係数 $K$ は、円筒の長さ $L$ と円筒の外径 $d$ の比及び両端の支持条件により決まる定数である。今、円筒の長さを無限長さであるとするならば、 $K$ は両端の支持条件にかかわらず一定となり、その値は2.20となる。本試験で使用されたライナー管の材質はハステロイ-Xで、室温でのヤング率は $2.03 \times 10^5$  MPaである。ライナー管の長さは無限長さではないが、安全側に評価するためにここで $K = 2.20$ として考える。この条件で許容外圧を計算すると、 $P_{cr} = 2.14$  MPaとなる。しかし、5.2節でも述べたように、本試験においてライナー管に発生する差圧は、許容外圧2.14 MPaを超えた(測定可能な範囲で、最大2.69 MPaであった)にもかかわらず、座屈は生じなかった。これは、本試験に用いた高温配管の長さ $L$ が、その外径 $d$ に比して十分長くなかったため、すなわち座屈強度係数 $K$ を小さく見積りすぎているためと考えられる。

### 5.6 仕切板に対する強度評価

高温配管内部構造物の一つである仕切板に対する強度評価を実施した。本試験で使用された仕切板はハステロイ-X製のV形仕切板で、ライナー管と耐圧管で溶接されている。今、計算を簡便化するために、V形仕切板の厚さ0.8 mmを、この仕切板と等価は断面二次モーメントを持つ円輪板の厚さで置き換える。この時、円輪板の厚さは14.9 mmとなる。外周固定、内周可動片固定で等分布荷重の場合、円輪板に加わる最大応力は、次式で表せる。

$$\sigma_{max} = \beta P a^2 / h^3 \quad (5.2)$$

- $\sigma_{max}$  : 最大応力 [MPa]
- $\beta$  : 応力係数 [ - ]
- $P$  : 円輪板に加わる荷重 [MPa]
- $a$  : ライナー管の半径 [mm]
- $h$  : 円輪板の厚さ [mm]

ここで、応力係数 $\beta$ は内外周の支持条件により決まり、内周可動片固定、外周固定の場合、 $\beta = 0.12$ となる。本減圧試験装置による全試験の中で、仕切板に発生した最大の差圧は、5.4節で述べたようにヘリウムガスを使用した場合の0.45 MPaであった。この時、上式(5.2)を用いて最大応力 $\sigma_{max}$ を計算すると23.1 MPaとなる。今、室温におけるハステロイXの降伏応力は241 MPaであるため、より厳しい条件で試験が継続されても急速減圧時における仕切板の健全性に全く問題がないことが分かる。また、試験研究炉で設計されている950℃の温度条件におけるハステロイXの降伏応力は63.7 MPaであることから、実機での急速減圧事故時にも十分に健全性は保たれると考えられる。

### 5.7 試験研究炉で想定される減圧事故事象との比較

Table 5.1 に、試験研究炉において想定される主な減圧事故事象及び減圧速度と、その減圧速度に対して本試験で得られたライナー管及び仕切板の差圧を示す。スライドジョイント部開口面積は、1250 mm<sup>2</sup>で考えた。最も大きな減圧事故事象である原子炉主冷却系配管の大破断や2次系の冷却材喪失事故の場合で、減圧速度は各々2.0 MPa/s、1.3 MPa/sであり、本試験で検討した減圧速度を用いてヘリウムガス雰囲気中でライナー管(仕切板)に発生する差圧を推定すると各々1.04 MPa(0.33 MPa)、0.67 MPa(0.24 MPa)となり、5.5、5.6節で検討した許容値を十分下回る。従って、急速減圧事故時において高温配管内部構造物であるライナー管及び仕切板の健全性は保たれると考えられる。

Table 5.1 試験研究炉において想定される主な減圧事故事象の減圧速度と本試験においてライナー管及び仕切板に発生する差圧

試験研究炉において想定される主な減圧事故事象	減圧速度 (MPa/s)	ライナー管に発生する最大差圧 (MPa)		仕切板に発生する最大差圧 (MPa)	
		窒素	ヘリウム	窒素	ヘリウム
原子炉主冷却系配管の大破断事故	2.0	1.36	1.04	0.27	0.33
2次系の冷却材喪失事故	1.3	0.86	0.67	0.19	0.24
原子炉冷却系の大口徑配管クラック事故	0.15	0.15	0.05	0.02	0.05
所外電源喪失事故	$0.12 \times 10^{-3}$	~ 0	~ 0	~ 0	~ 0

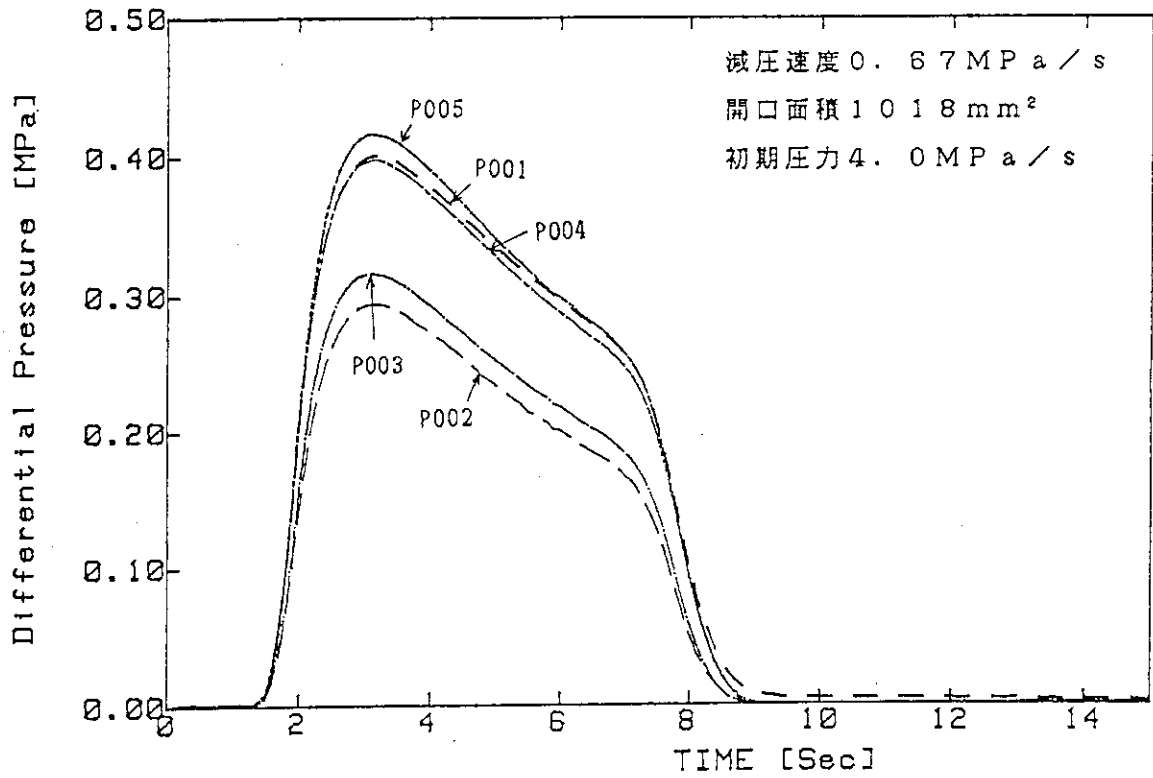


Fig. 5.1 ライナー管に発生する差圧と時間の関係 (窒素ガス, 試験No. 540)

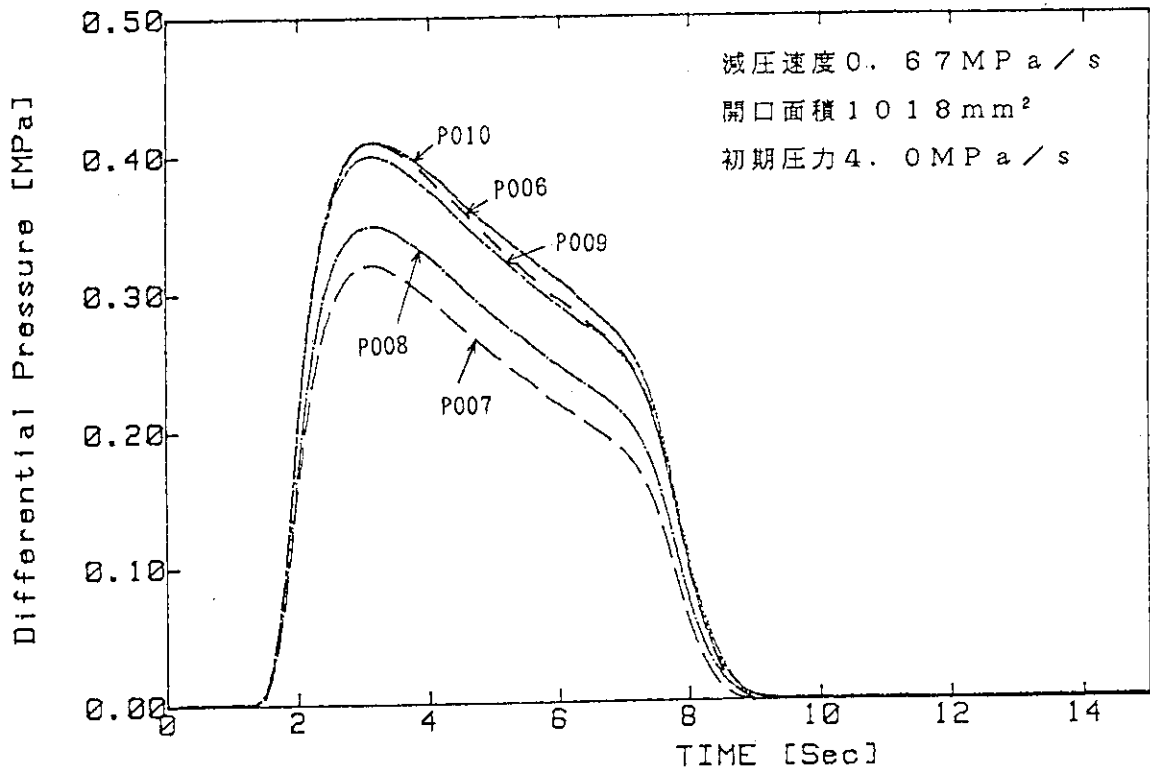


Fig. 5.2 耐圧管に発生する差圧と時間の関係 (窒素ガス, 試験No. 540)



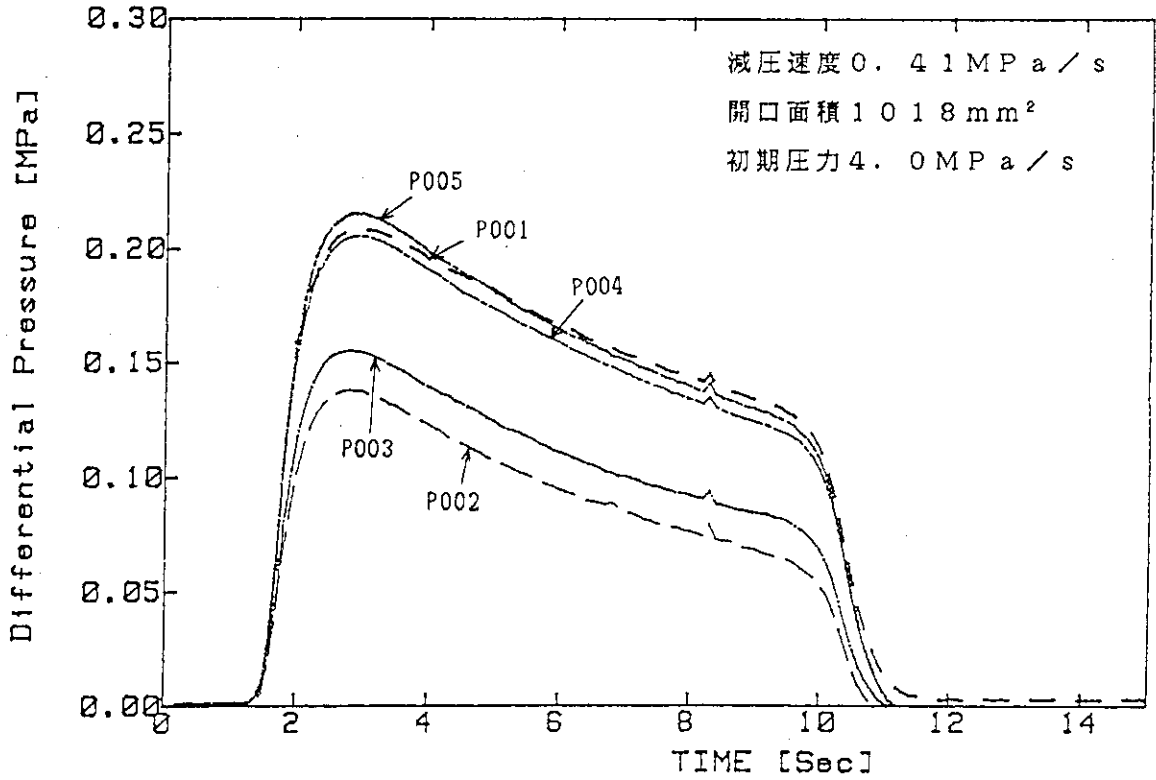


Fig. 5.3 ライナー管に発生する差圧と時間の関係 (窒素ガス, 試験No. 440)

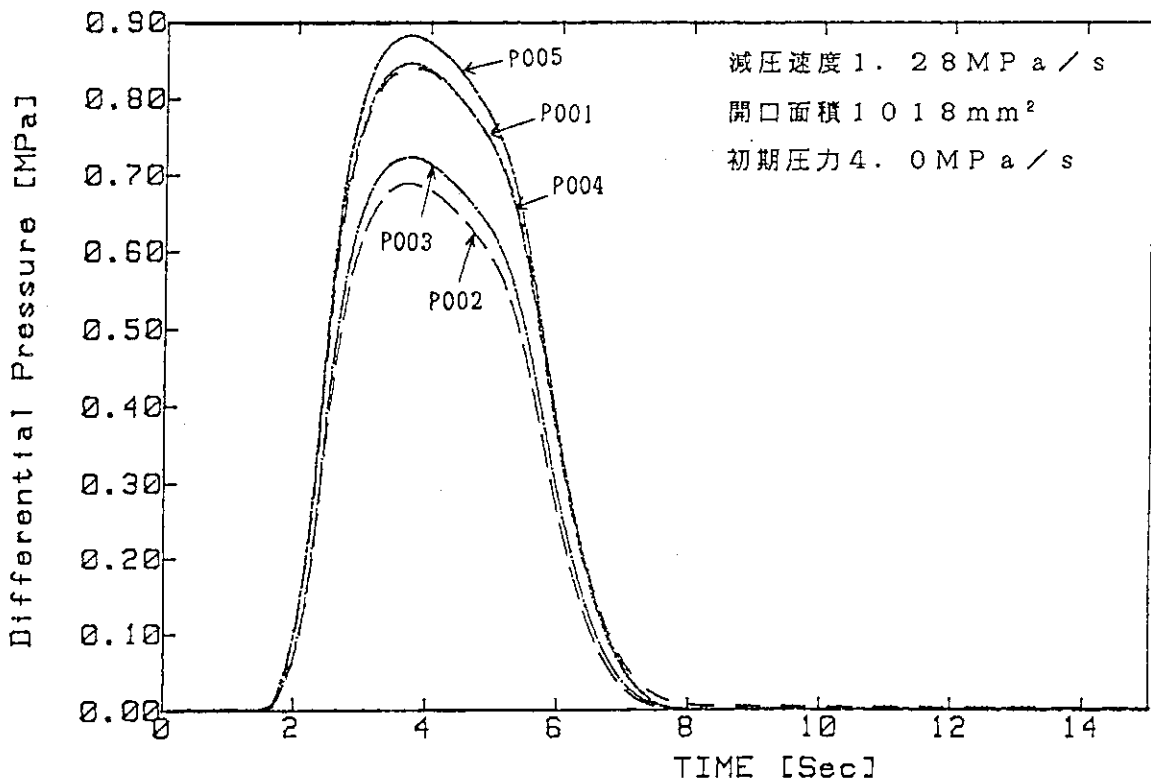


Fig. 5.4 ライナー管に発生する差圧と時間の関係 (窒素ガス, 試験No. 740)

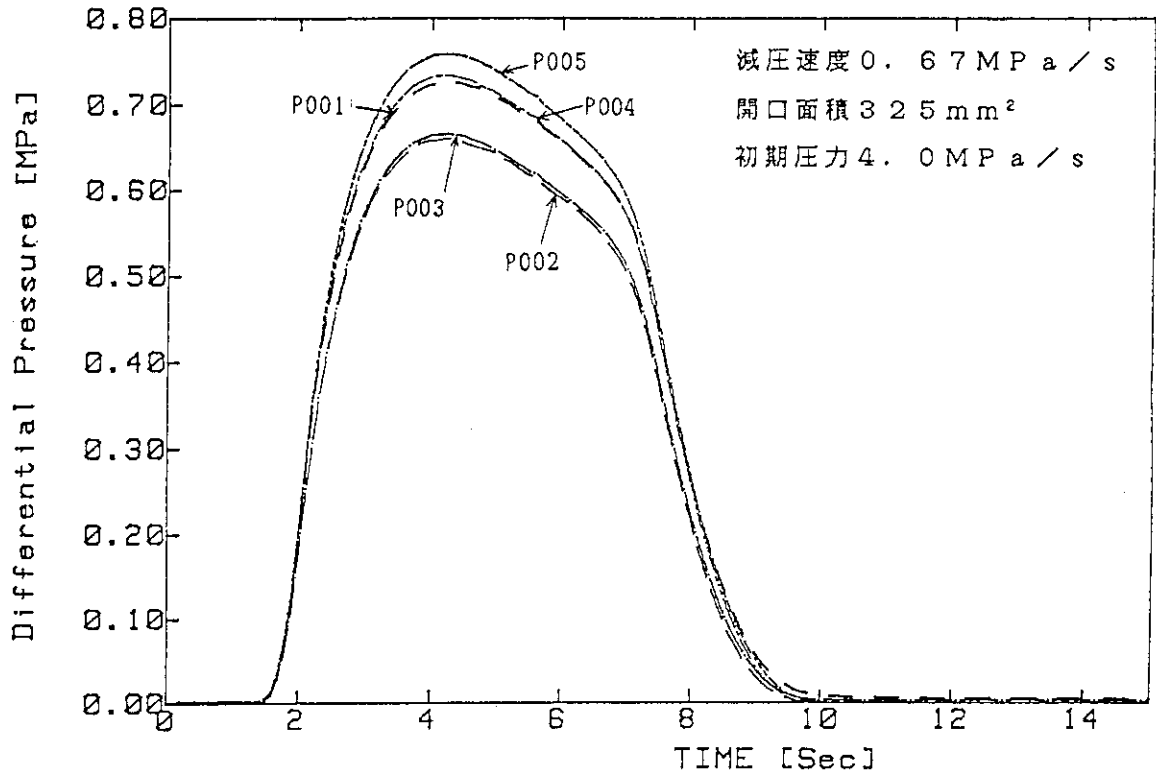


Fig. 5.5 ライナー管に発生する差圧と時間の関係 (窒素ガス, 試験No. 560)

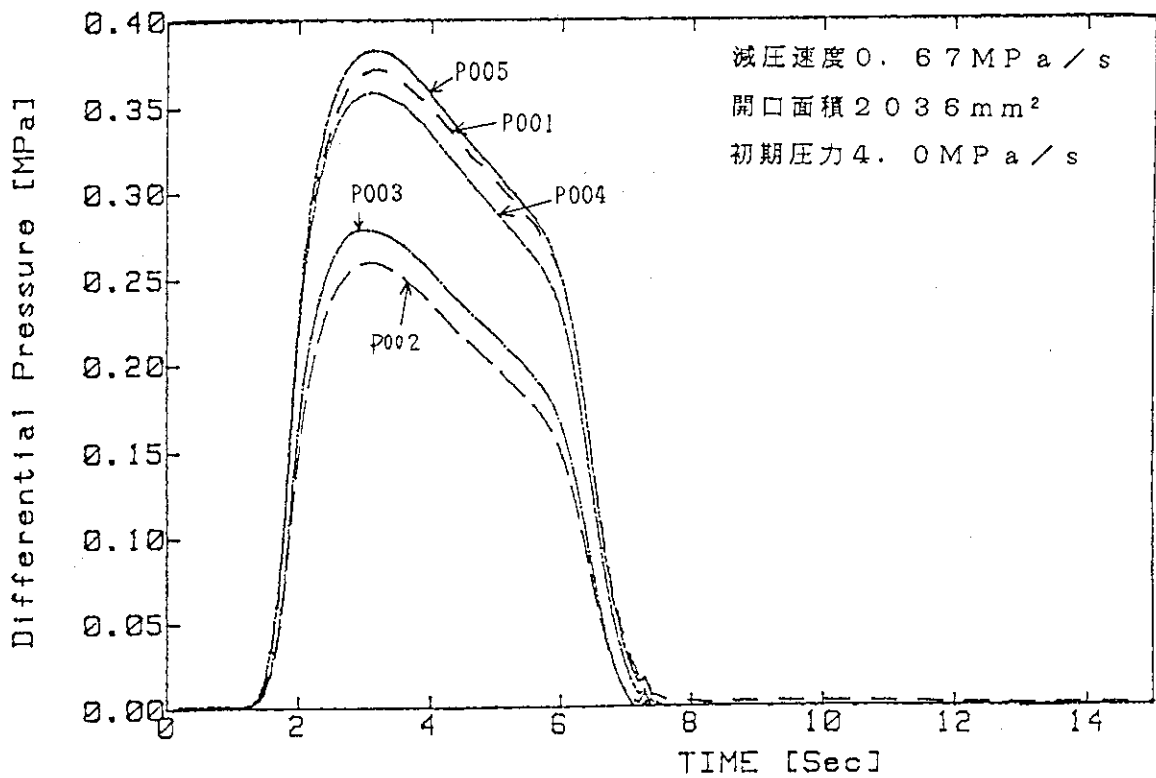


Fig. 5.6 ライナー管に発生する差圧と時間の関係 (窒素ガス, 試験No. 530)

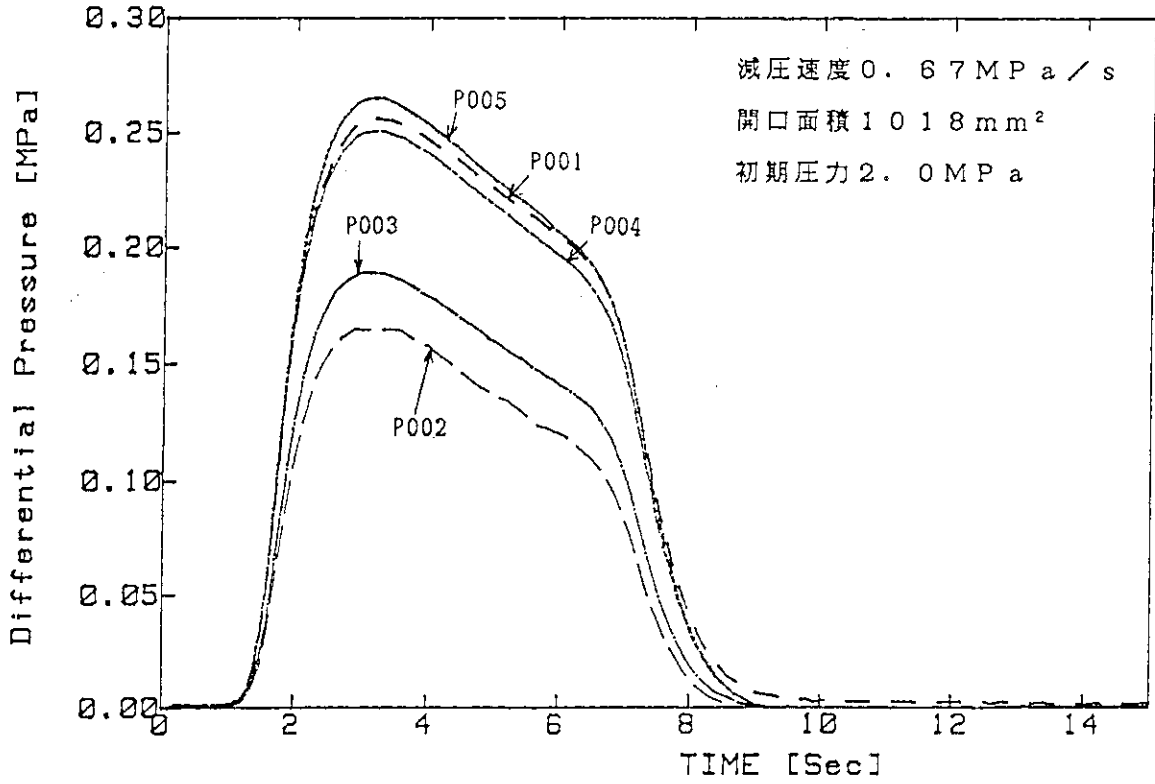


Fig. 5.7 ライナー管に発生する差圧と時間の関係 (窒素ガス, 試験No. 541)

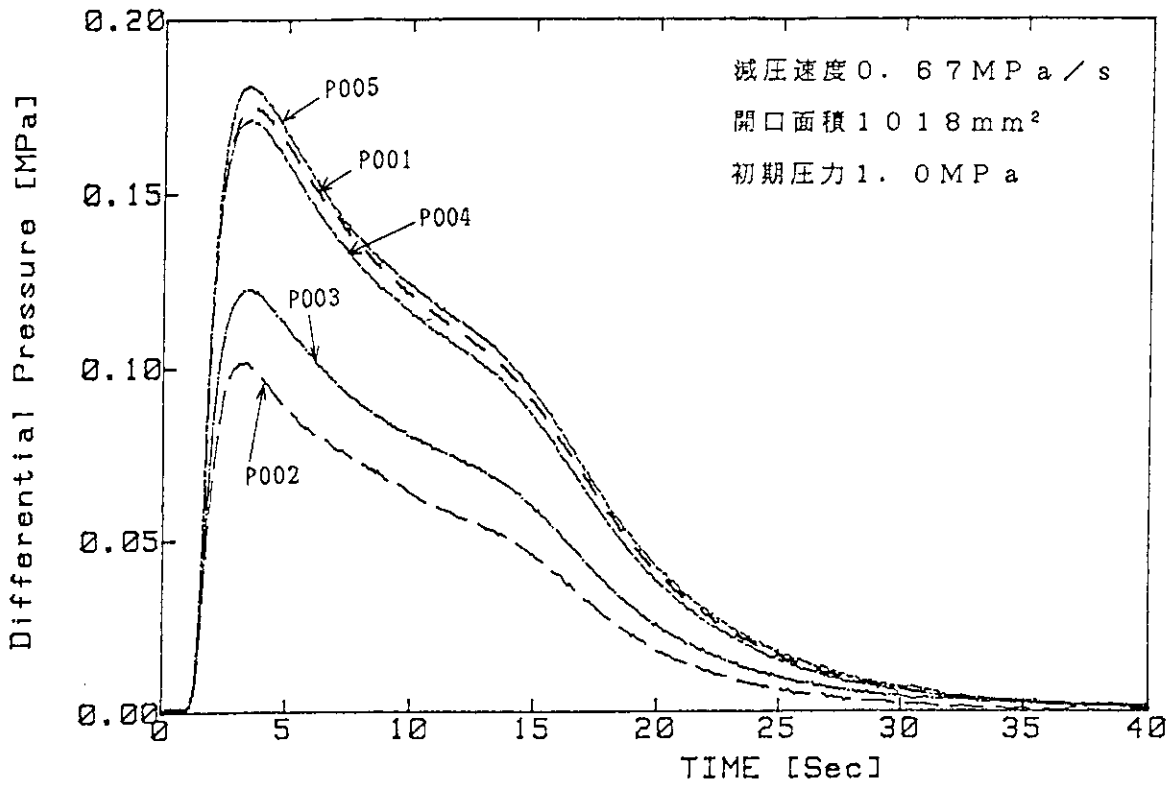


Fig. 5.8 ライナー管に発生する差圧と時間の関係 (窒素ガス, 試験No. 542)

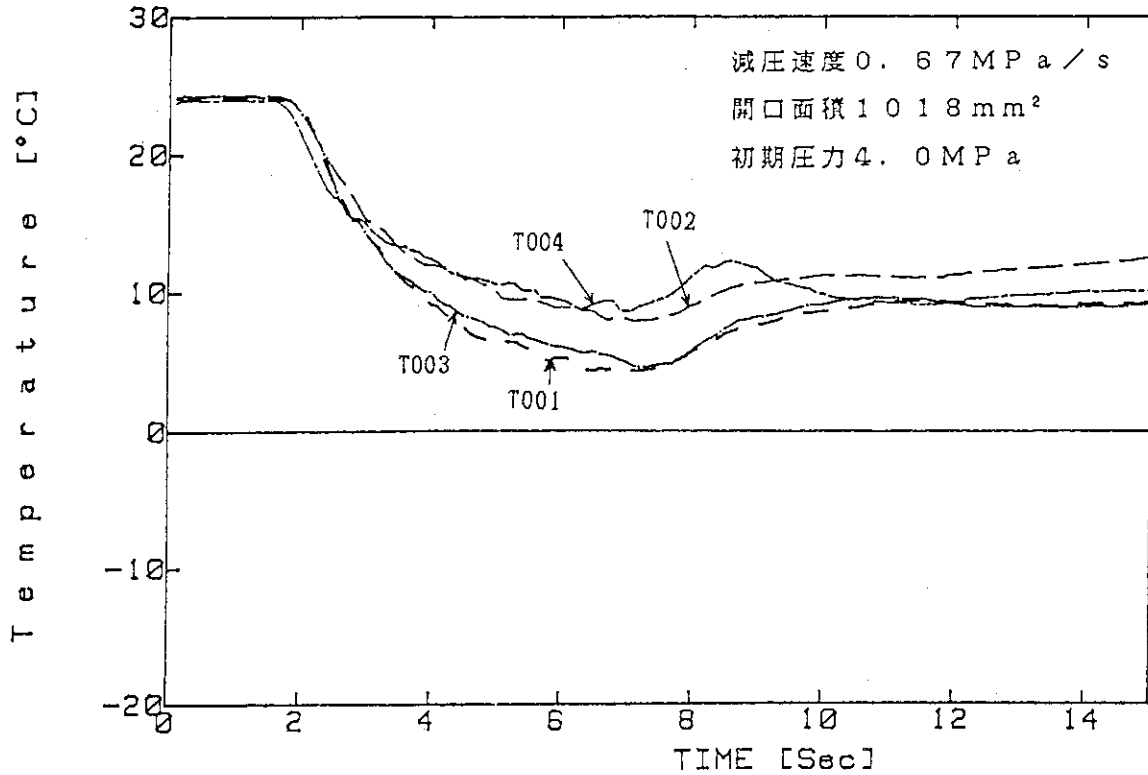


Fig. 5.9 試験体内部のガス温度と時間の関係 (窒素ガス, 試験No. 540)

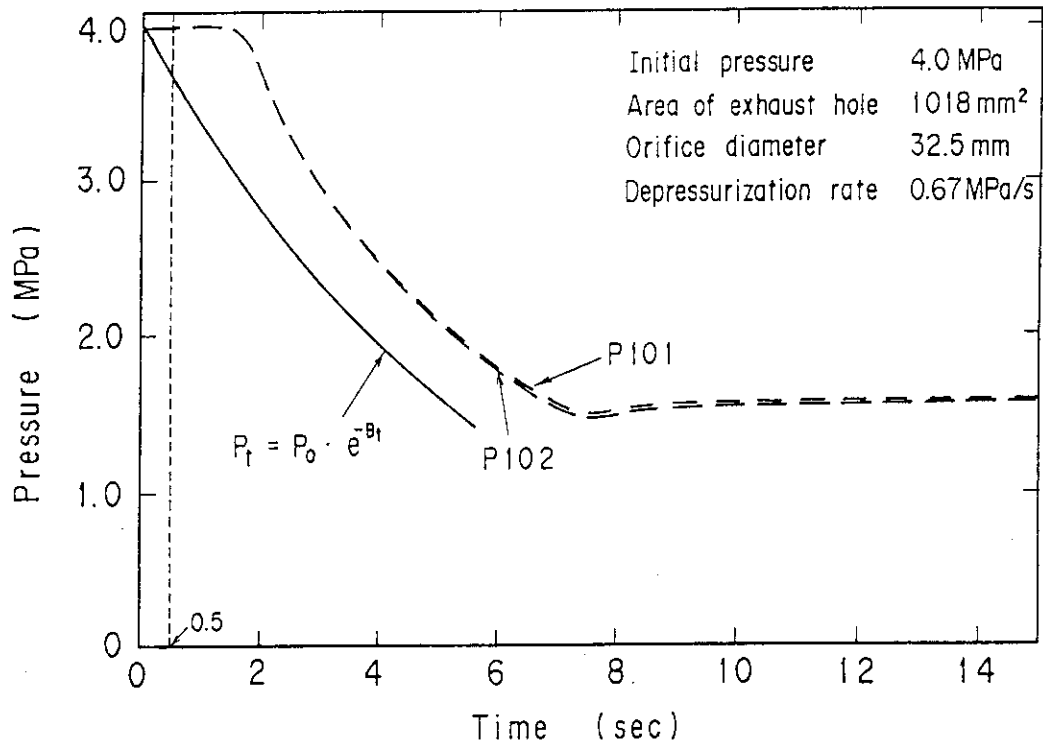


Fig. 5.10 高圧容器内圧力と時間との関係 (窒素ガス, 試験No. 540)

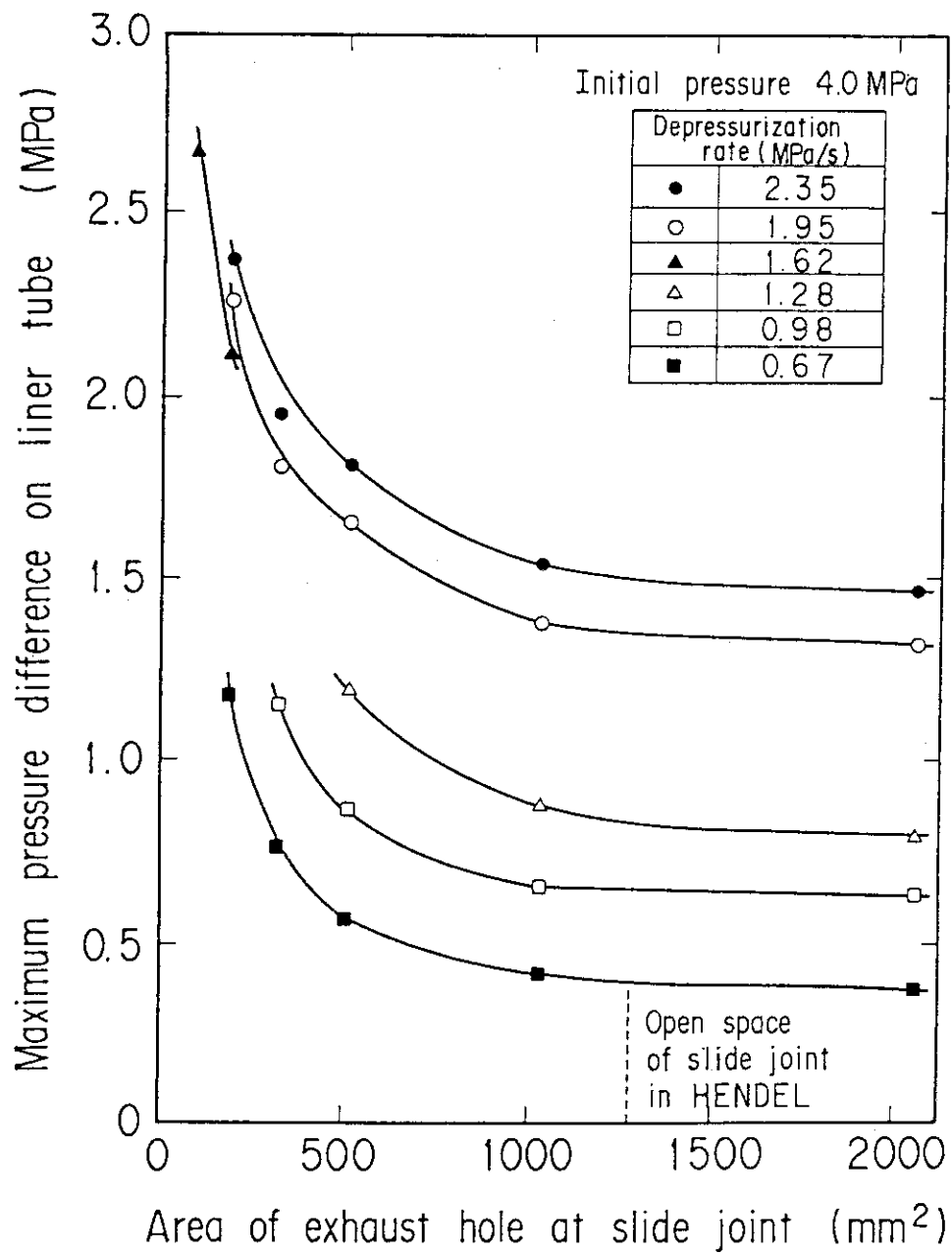


Fig. 5.11 窒素ガス雰囲気中でライナー管に発生する差圧とスライドジョイント部開口面積の関係 (パラメータ：減圧速度)

No. 91

P001 P002 P003 P004 P005 Po= 4.01

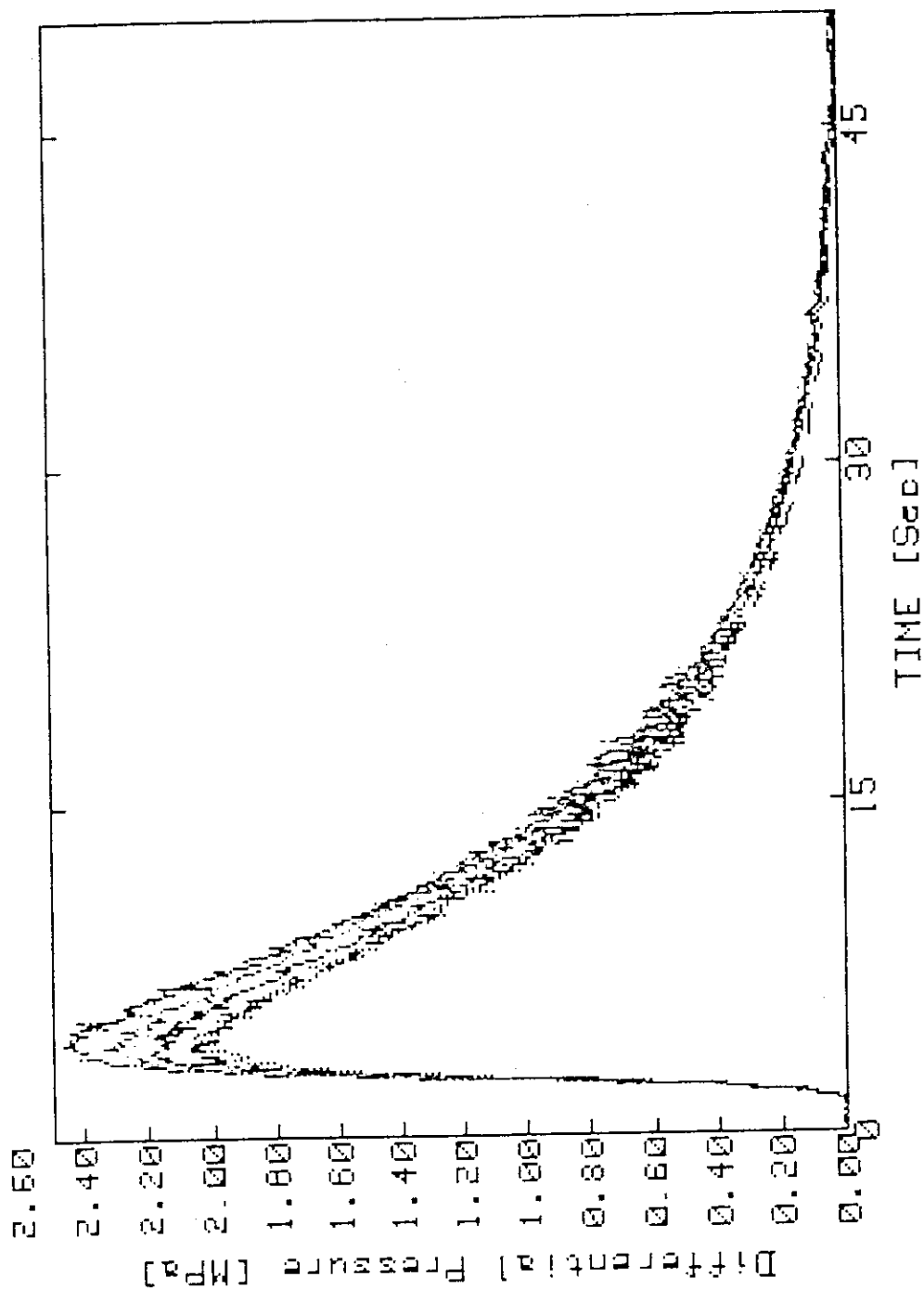


Fig. 5.12 ライナー管に発生する差圧の振動例 (窒素ガス, 試験No.91)

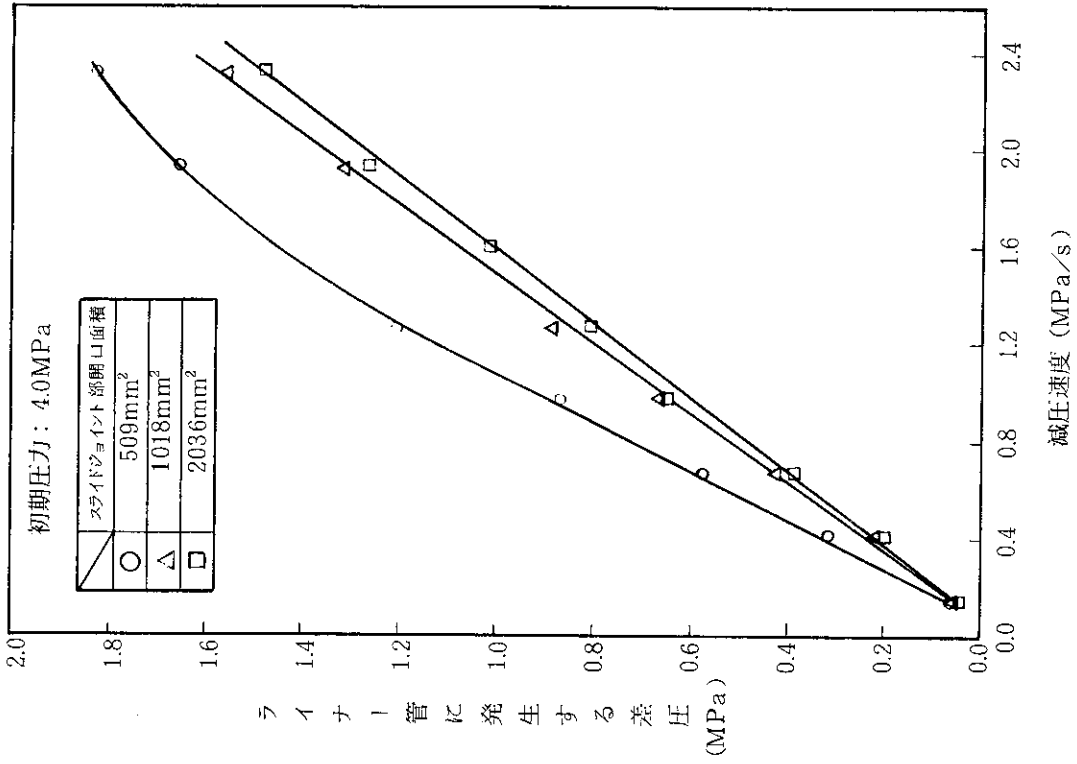


Fig. 5.14 窒素ガス雰囲気中でライナー管に発生する蒸圧と減圧速度の関係 (パラメータ: スライドジョイント部開口面積)

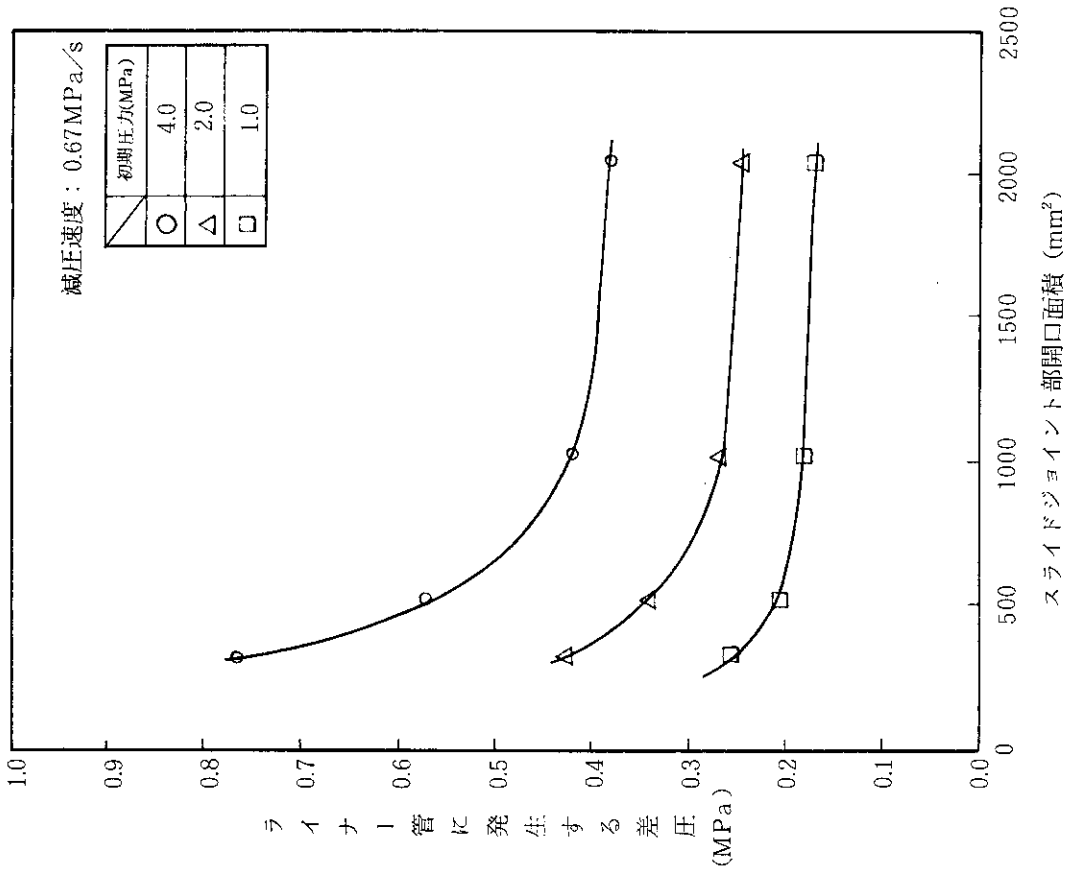


Fig. 5.13 窒素ガス雰囲気中でライナー管に発生する蒸圧とスライドジョイント部開口面積の関係 (パラメータ: 初期圧力)

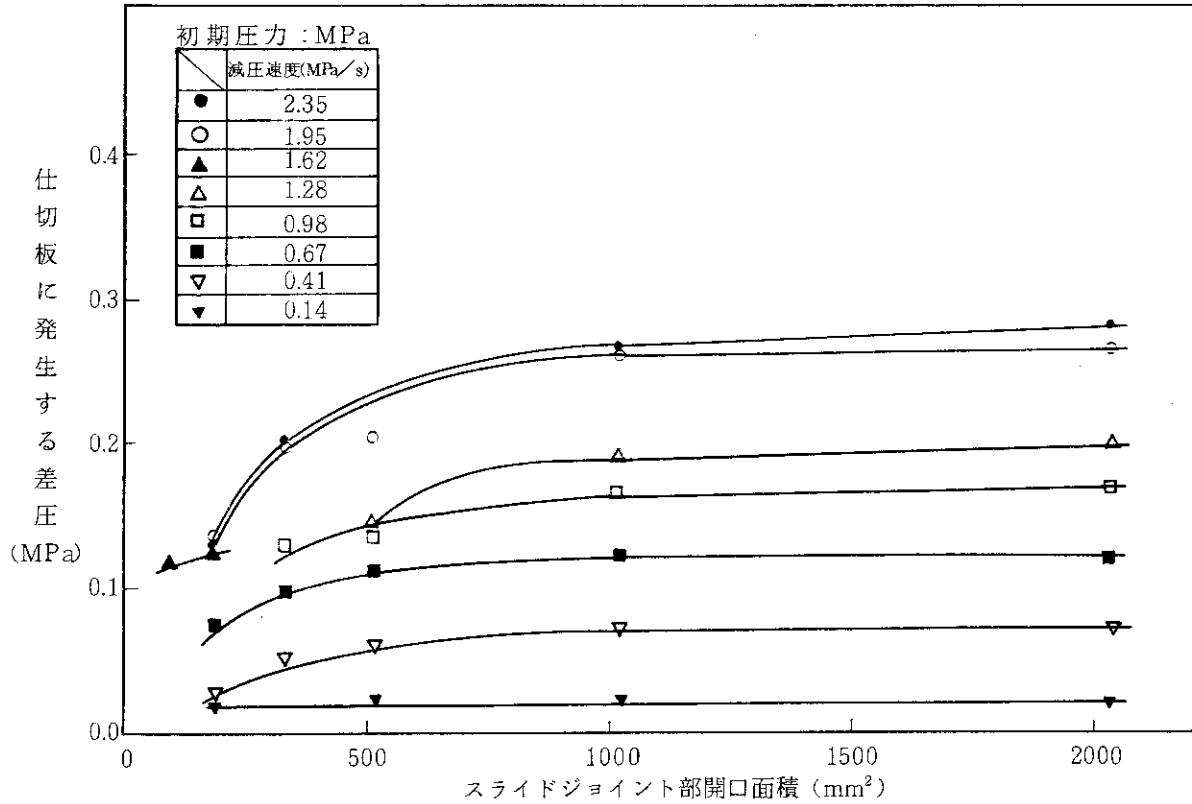


Fig. 5.15 窒素ガス雰囲気中で仕切板に発生する差圧とスライドジョイント部開口面積の関係 (パラメータ: 減圧速度)

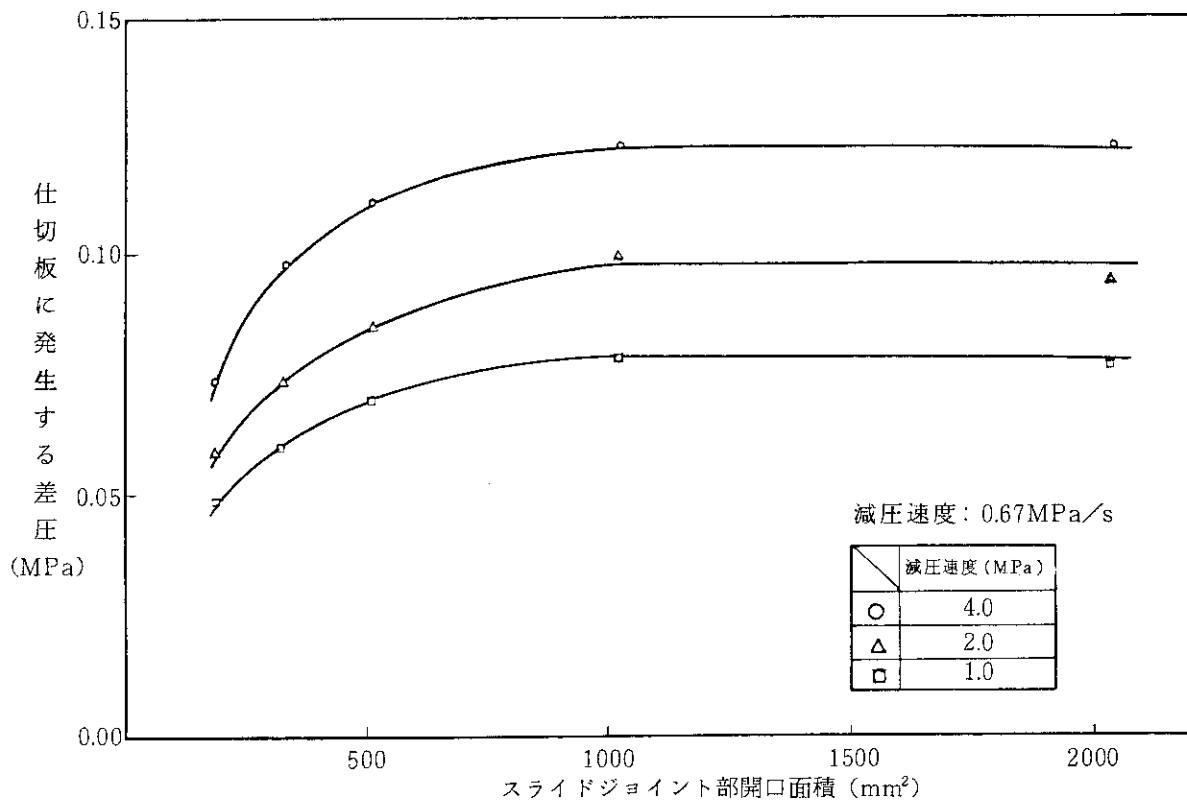


Fig. 5.16 窒素ガス雰囲気中で仕切板に発生する差圧とスライドジョイント部開口面積の関係 (パラメータ: 初期圧力)



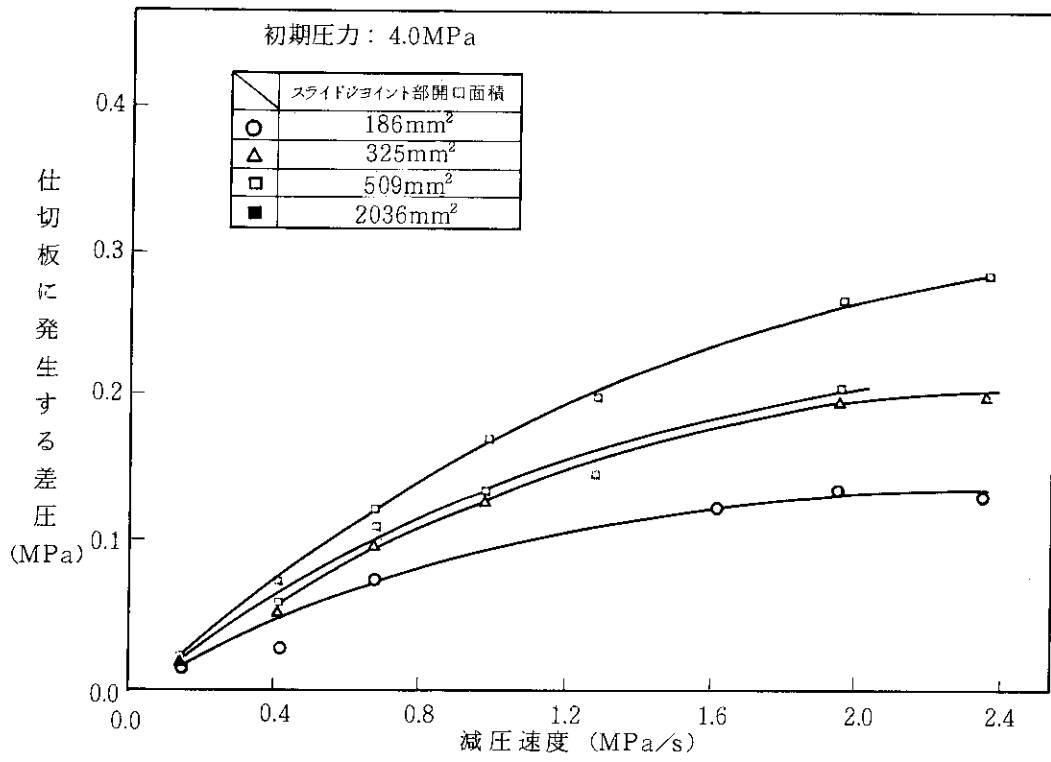


Fig. 5.17 窒素ガス雰囲気中で仕切板に発生する差圧と減圧速度の関係

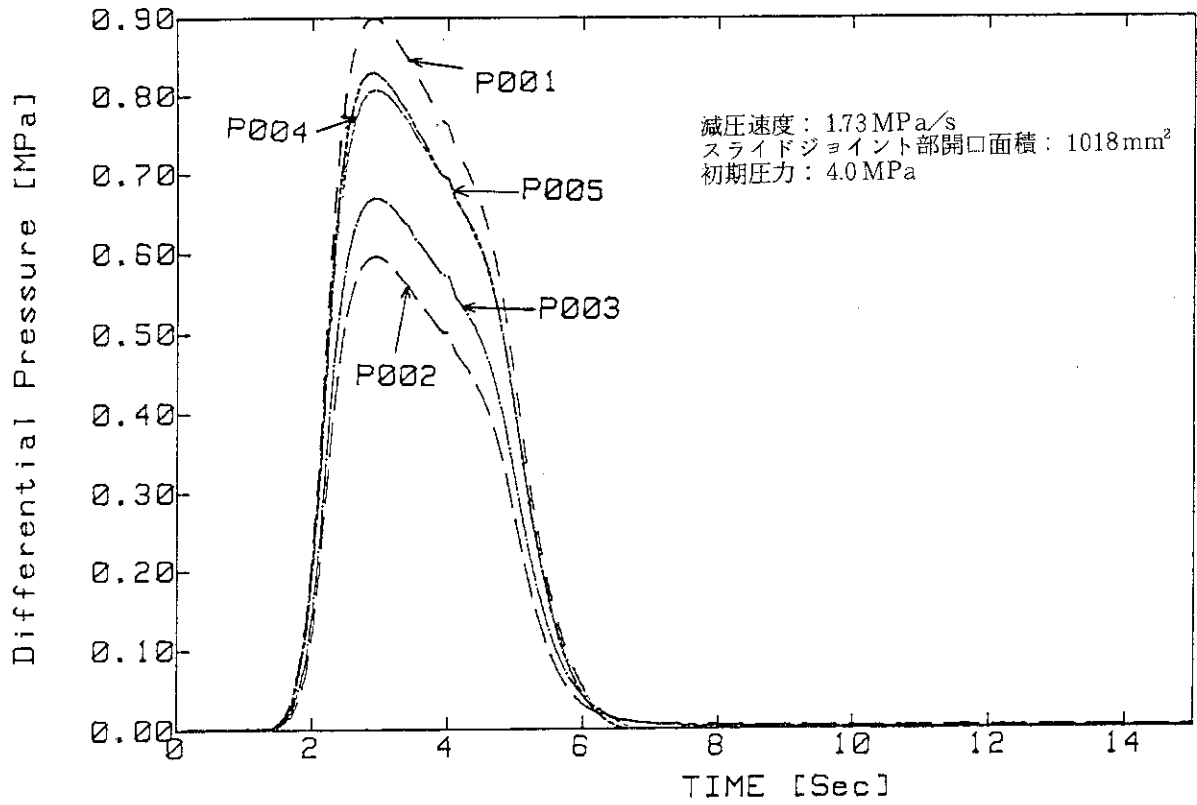


Fig. 5.18 ライナー管に発生する差圧と時間の関係 (ヘリウムガス, 試験No. 506)

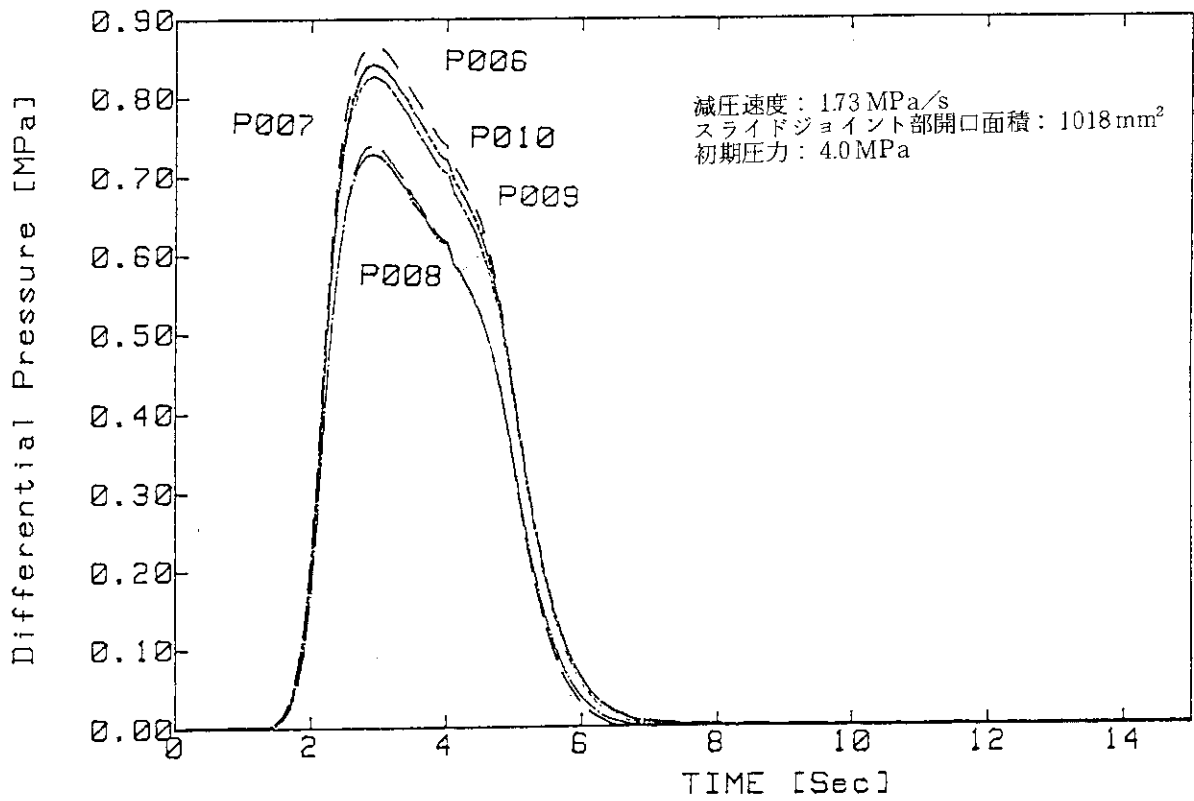


Fig. 5.19 耐圧管に発生する差圧と時間の関係 (ヘリウムガス, 試験No. 506)

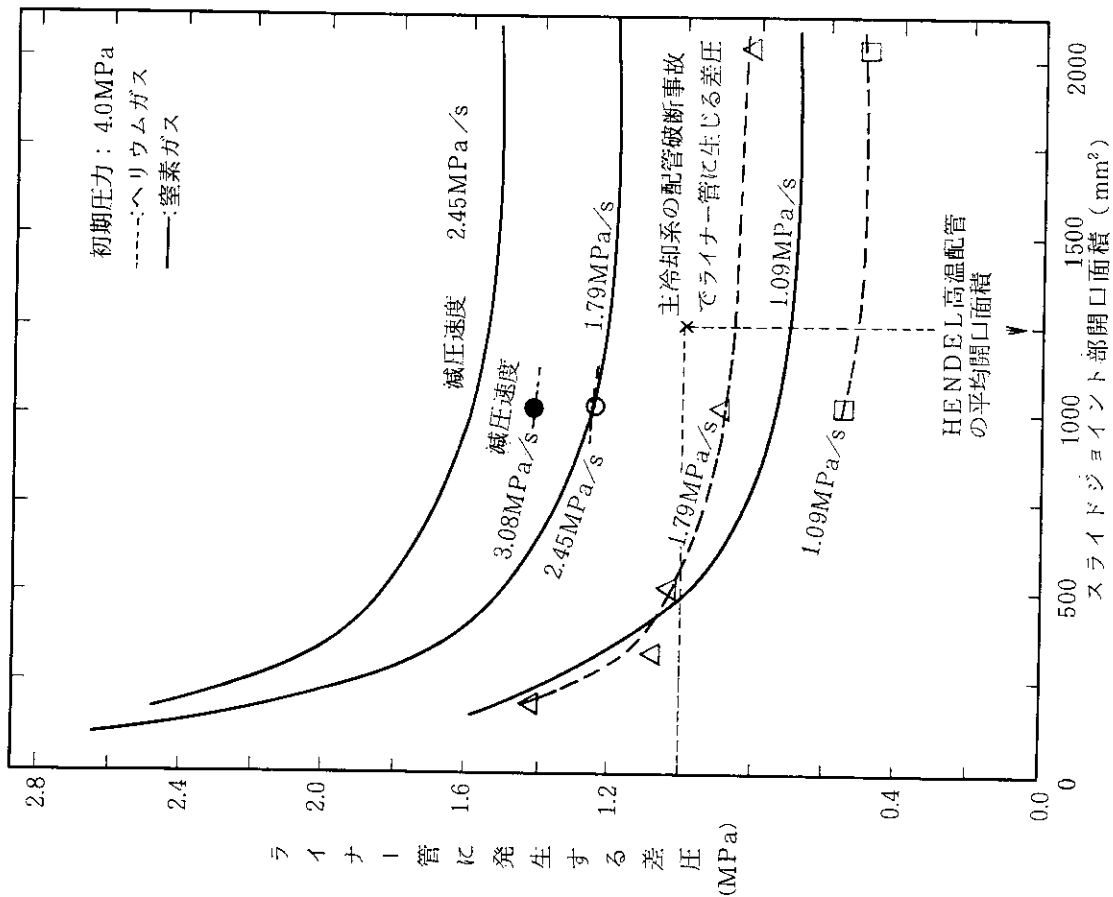


Fig. 5.21 ライナー管に発生する差圧とスライドジョイント部開口面積の関係

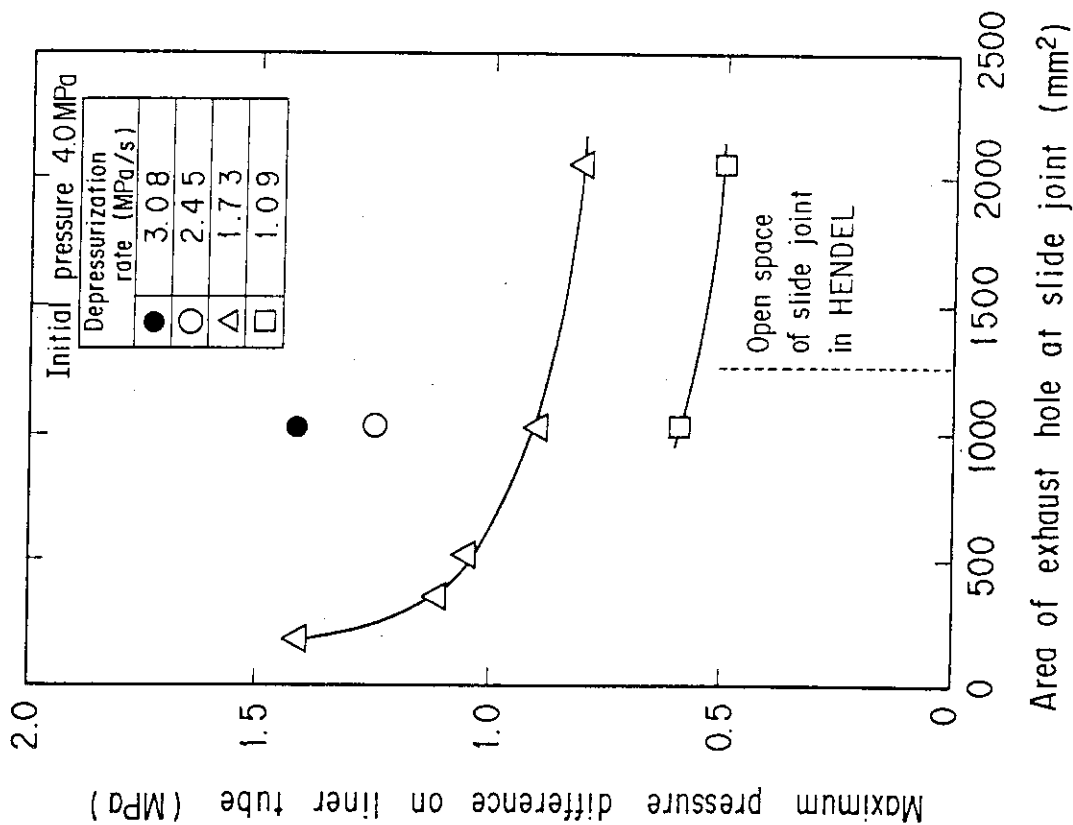


Fig. 5.20 ヘリウムガス雰囲気中でライナー管に発生する差圧とスライドジョイント部開口面積の関係 (パラメータ: 減圧速度)

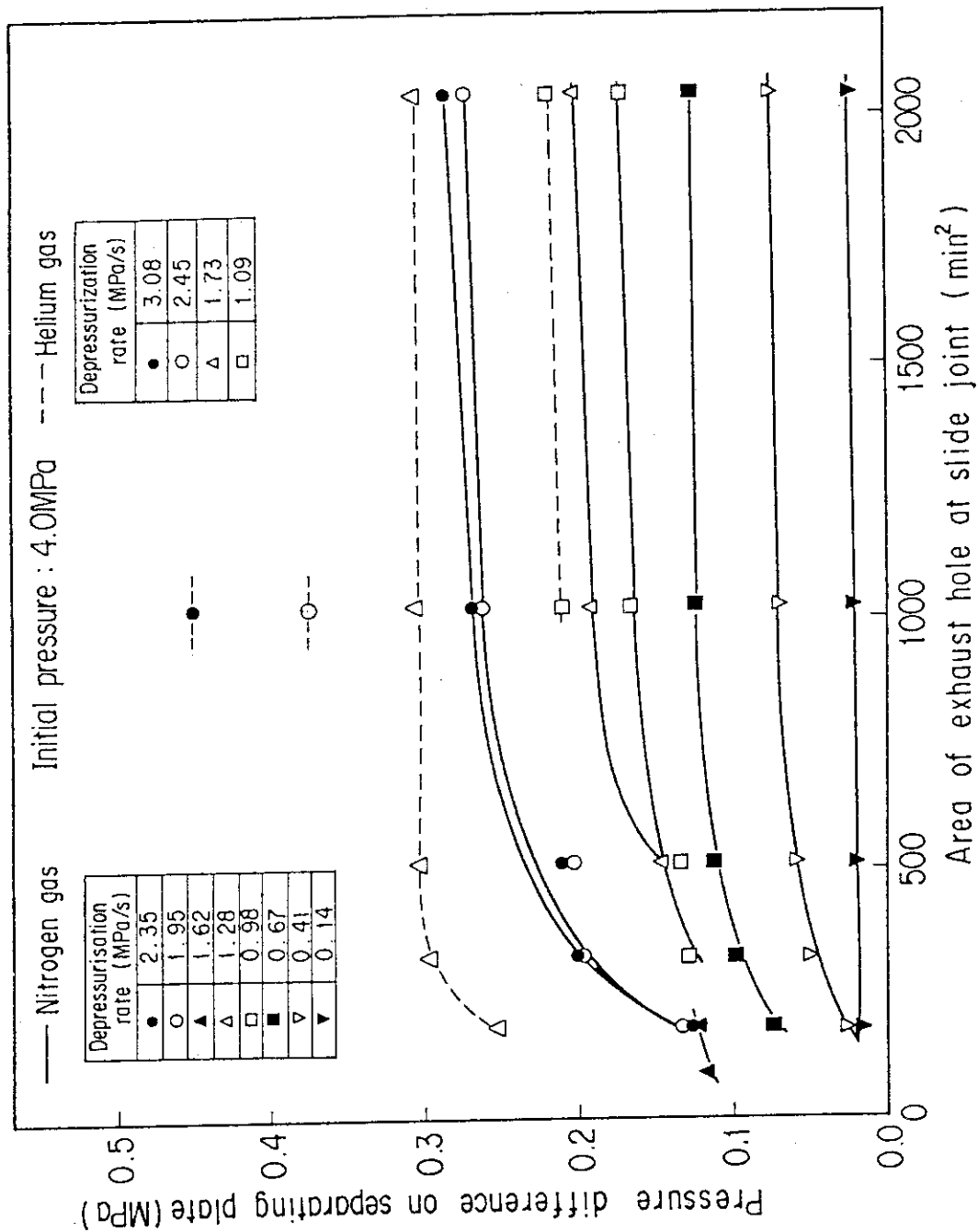


Fig. 5.22 仕切板に発生する差圧の比較

## 6. 使用後検査結果

試験は、Table 4.1 及び Table 4.2 から分かるように、高圧容器内初期圧力 4.0 MPa の条件で 48 回、2.0 MPa で 36 回、1.0 MPa の条件で 36 回と、合計で 120 回実施した。試験後、随時目視検査を実施しライナー管及び耐圧管の健全性を確認したが、仕切板等の内部断熱層内にある内部構造物については目視による外観検査ができないため、全試験終了後、試験体として使用した高温配管を切断・解体し使用後検査を行った。Photo. 6.1 と Photo. 6.2 は、検査の一例として使用後の仕切板及び断熱材の写真を示す。使用後検査の結果、写真からも明らかなように、仕切板及び断熱材に対して本減圧試験により生じたと考えられる損傷・変形等の異常は見られなかった。また、その他の高温配管内部構造物であるライナー管・耐圧管・SUS 箔及びスタッドボルトについても全く異常は見られず、急速事故時において高温配管の健全性は十分に保たれることを確認できた。

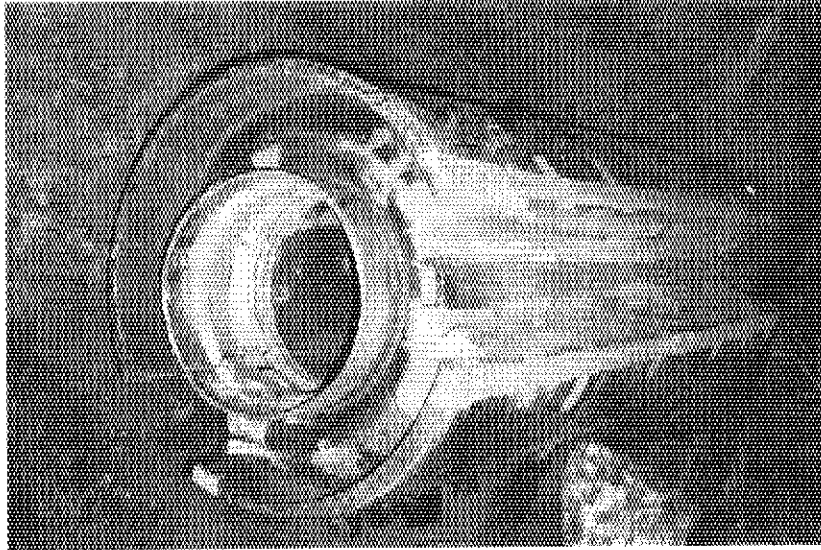


Photo.6.1 試験後の仕切板

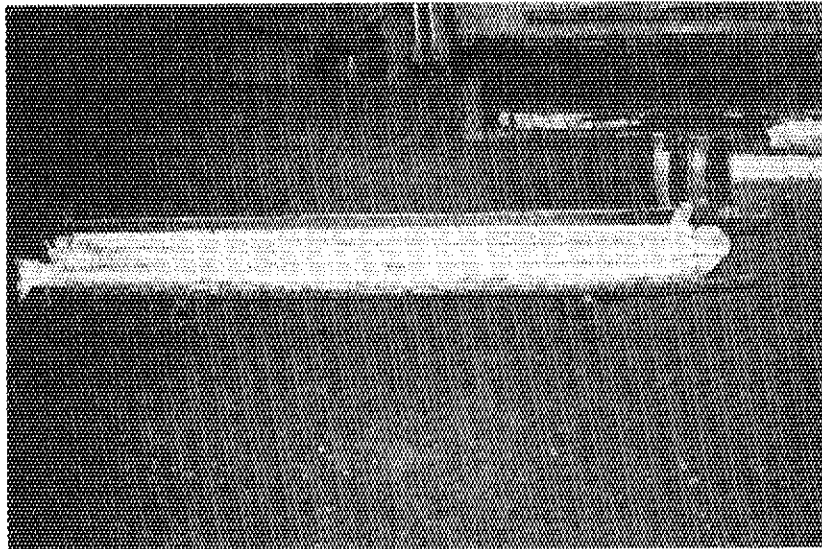


Photo.6.2 試験後の断熱材断面

## 7. 結 論

HENDEL高温配管を用いて、試験研究炉における急速減圧事故を対象とした試験を実施し、高温配管内部構造物であるライナー管及び仕切板に発生する差圧を調べた。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) ライナー管に発生する差圧は、減圧速度の増加につれ、また、スライドジョイント部開口面積の減少と共に増大した。仕切板に発生する差圧は、減圧速度の増加につれ、また、スライドジョイント部開口面積の増加と共に増大した。
- (2) 同一減圧速度においてヘリウムガス雰囲気中でライナー管に発生する差圧は、窒素ガス雰囲気中に比べて、20～40%小さかった。一方、ヘリウムガス雰囲気中で仕切板に発生する差圧は、窒素ガス雰囲気中に比べて25～35%大きかった。
- (3) 試験研究炉において想定される急速減圧事故事象の中で最大の減圧事故である主冷却系配管の破断を模擬した条件（ヘリウムガス雰囲気、減圧速度 2.0 MPa/s, スライドジョイント部開口面積 1250 mm<sup>2</sup>, 初期圧力 4.0 MPa）下で、ライナー管に発生する差圧は 1.04 MPa, 仕切板に発生する差圧は 0.33 MPaであった。
- (4) 本減圧試験装置でライナー管及び仕切板に発生した差圧の中で最大値は、各々 2.69 MPa, 0.45 MPa であった。しかし試験終了後、試験体である高温配管を切断・解体し使用後検査を実施したところ、高温配管内部構造物であるライナー管、耐圧管、仕切板及び断熱材に変形・損傷等の異常は見られなかった。また、応力評価でもライナー管及び仕切板の健全性は十分に保たれている事が確認できた。

## 謝 辞

最後に、本試験を行うにあたり適切な助言を頂いたHENDEL開発試験室室員の皆様、並びに本実験についてご協力を頂いた原子力エンジニアリングの会沢良二氏、HENDEL管理室の渡辺周二氏、また試験データの整理をして頂いた谷平博子氏に心から感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) 日本原子力研究所：“日ソ高温ガス炉機器セミナー原産代表団報告書”，1988年12月
- (2) 安藤良夫他：“原子力プラントの構造設計”，東京大学出版界，1977年1月
- (3) 日本原子力研究所：“多目的高温ガス実験炉設計資料集”
- (4) 日本機械学会編：“機械工学便覧 改訂第6版”

## 7. 結 論

HENDEL高温配管を用いて、試験研究炉における急速減圧事故を対象とした試験を実施し、高温配管内部構造物であるライナー管及び仕切板に発生する差圧を調べた。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) ライナー管に発生する差圧は、減圧速度の増加につれ、また、スライドジョイント部開口面積の減少と共に増大した。仕切板に発生する差圧は、減圧速度の増加につれ、また、スライドジョイント部開口面積の増加と共に増大した。
- (2) 同一減圧速度においてヘリウムガス雰囲気中でライナー管に発生する差圧は、窒素ガス雰囲気中に比べて、20～40%小さかった。一方、ヘリウムガス雰囲気中で仕切板に発生する差圧は、窒素ガス雰囲気中に比べて25～35%大きかった。
- (3) 試験研究炉において想定される急速減圧事故事象の中で最大の減圧事故である主冷却系配管の破断を模擬した条件（ヘリウムガス雰囲気、減圧速度 2.0 MPa/s、スライドジョイント部開口面積 1250 mm<sup>2</sup>、初期圧力 4.0 MPa）下で、ライナー管に発生する差圧は 1.04 MPa、仕切板に発生する差圧は 0.33 MPaであった。
- (4) 本減圧試験装置でライナー管及び仕切板に発生した差圧の中で最大値は、各々 2.69 MPa、0.45 MPa であった。しかし試験終了後、試験体である高温配管を切断・解体し使用後検査を実施したところ、高温配管内部構造物であるライナー管、耐圧管、仕切板及び断熱材に変形・損傷等の異常は見られなかった。また、応力評価でもライナー管及び仕切板の健全性は十分に保たれている事が確認できた。

## 謝 辞

最後に、本試験を行うにあたり適切な助言を頂いたHENDEL開発試験室室員の皆様、並びに本実験についてご協力を頂いた原子力エンジニアリングの会沢良二氏、HENDEL管理室の渡辺周二氏、また試験データの整理をして頂いた谷平博子氏に心から感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) 日本原子力研究所：“日ソ高温ガス炉機器セミナー原産代表団報告書”，1988年12月
- (2) 安藤良夫他：“原子力プラントの構造設計”，東京大学出版界，1977年1月
- (3) 日本原子力研究所：“多目的高温ガス実験炉設計資料集”
- (4) 日本機械学会編：“機械工学便覧 改訂第6版”



## 7. 結 論

HENDEL高温配管を用いて、試験研究炉における急速減圧事故を対象とした試験を実施し、高温配管内部構造物であるライナー管及び仕切板に発生する差圧を調べた。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) ライナー管に発生する差圧は、減圧速度の増加につれ、また、スライドジョイント部開口面積の減少と共に増大した。仕切板に発生する差圧は、減圧速度の増加につれ、また、スライドジョイント部開口面積の増加と共に増大した。
- (2) 同一減圧速度においてヘリウムガス雰囲気中でライナー管に発生する差圧は、窒素ガス雰囲気中に比べて、20～40%小さかった。一方、ヘリウムガス雰囲気中で仕切板に発生する差圧は、窒素ガス雰囲気中に比べて25～35%大きかった。
- (3) 試験研究炉において想定される急速減圧事故事象の中で最大の減圧事故である主冷却系配管の破断を模擬した条件（ヘリウムガス雰囲気、減圧速度 2.0 MPa/s、スライドジョイント部開口面積 1250 mm<sup>2</sup>、初期圧力 4.0 MPa）下で、ライナー管に発生する差圧は 1.04 MPa、仕切板に発生する差圧は 0.33 MPaであった。
- (4) 本減圧試験装置でライナー管及び仕切板に発生した差圧の中で最大値は、各々 2.69 MPa、0.45 MPa であった。しかし試験終了後、試験体である高温配管を切断・解体し使用後検査を実施したところ、高温配管内部構造物であるライナー管、耐圧管、仕切板及び断熱材に変形・損傷等の異常は見られなかった。また、応力評価でもライナー管及び仕切板の健全性は十分に保たれている事が確認できた。

## 謝 辞

最後に、本試験を行うにあたり適切な助言を頂いたHENDEL開発試験室室員の皆様、並びに本実験についてご協力を頂いた原子力エンジニアリングの会沢良二氏、HENDEL管理室の渡辺周二氏、また試験データの整理をして頂いた谷平博子氏に心から感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) 日本原子力研究所：“日ソ高温ガス炉機器セミナー原産代表団報告書”，1988年12月
- (2) 安藤良夫他：“原子力プラントの構造設計”，東京大学出版界，1977年1月
- (3) 日本原子力研究所：“多目的高温ガス実験炉設計資料集”
- (4) 日本機械学会編：“機械工学便覧 改訂第6版”

## 付録 減圧特性解析

## A.1 基礎式

断熱材中のガスの透過流れを考慮すると、断熱材中のガス圧力は、主流圧力変化に追従するように軸方向に圧力分布を持ちながら変化する。そこで、スライドジョイント部及び雰囲気ガスの影響を調べるために、断熱材中のガスの透過流れに関する運動方程式に基づき、その解析解を求める非定常減圧特性解析を行った。また、解析結果と試験結果を比較し、減圧時における断熱材中の最適なダルシー数を検討した。

本非定常減圧特性解析に使用した仮定は、次の通りである。

- (1) 断熱材中のガスの流れは、一次元とする。
- (2) 断熱材は、透過流れに対し均質、等方性である。
- (3) 主流圧力の減少は、試験により得られた減圧曲線を使用する。
- (4) スライドジョイント部より噴出するガスの縮流係数は考慮しない。
- (5) 断熱材中でのガスの状態変化は、断熱材の熱容量が大きいいため等温変化とする。
- (6) スライドジョイント部でのガスの状態変化は、断熱変化とする。

上記仮定により、断熱材中の密度  $\rho$ 、圧力  $P$ 、スライドジョイント部噴出ガス流速  $u$  の関係を時間  $t$  と位置  $x$  で表すと、流れは一次元流れであるため連続の式及び運動量の式は、各々 (A.1) 式、(A.2) 式のようになる。ここで  $\mu$  はガスの粘性係数、 $k$  は断熱材中の透過率を表す。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0 \quad (\text{A.1})$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\mu}{k} u = 0 \quad (\text{A.2})$$

また、断熱材中のガスの状態方程式は、ガスの熱容量に比べて断熱材の熱容量が非常に大きいため等温変化とみなせる。従って (A.3) 式で表せる。

$$\frac{P}{\rho} = \text{const} \quad (\text{A.3})$$

次に、スライドジョイント部と主流ガス領域の接する位置における境界条件を考える。スライドジョイント部内でのガス圧力  $P_T$  は、スライドジョイント部からの噴出ガス流速を境界位置に置き換えることにより、(A.4) 式のように表せる。

$$P_T = P_1 \left\{ 1 + \frac{\kappa - 1}{\kappa} \cdot \frac{\rho_1}{P_1} \cdot \frac{u_1^2}{2g} \right\}^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad (\text{A.4})$$

スライドジョイント部での噴出ガスの状態変化は、断熱変化とみなせるので、スライドジョイント部内でのガス密度  $\rho_T$  は、(A.5) 式となる。

$$\rho_T = P_T^{\frac{1}{\kappa}} \quad (\text{A.5})$$

また、スライドジョイント部での噴出ガス臨界流速  $u^*$  は、(A.6)式となる。

$$u_1^* = \frac{A_1}{A} \left\{ g \cdot \kappa \cdot \left( \frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}} \cdot \frac{P_0}{\rho_0} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.6})$$

ここで、 $A_1$  はスライドジョイント部開口面積、 $A$  は断熱材等価断面積、 $\rho$  はガス密度、 $\kappa$  は断熱指数、 $g$  は重力加速度、添字 T はスライドジョイント部内のガスの状態、添字 1 はスライドジョイントと断熱材の境界部分状態、添字 0 は初期状態を表している。

境界での質量流量を求めると、スライドジョイント部内でのガス圧力  $P_T$  と主流ガス圧力  $P_a$  との関係が (A.7) 式の条件を満足する場合、ガスの流れは臨界状態となり、境界における質量流量は、(A.8) 式で表すことができる。

$$\frac{P_a}{P_T} \leq \left( \frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (\text{A.7})$$

$$\rho_1 u_1 = \frac{A_1}{A} \left\{ \left( \frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}} \cdot g \cdot \kappa \cdot P_T \rho_T \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.8})$$

また、(A.9) 式の関係を満たす場合は、ガスの流れは亜臨界状態となり、境界における質量流量は、(A.10) 式で表せる。

$$\frac{P_a}{P_T} > \left( \frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (\text{A.9})$$

$$\rho_1 u_1 = \frac{A_1}{A} \left[ \frac{2\kappa}{\kappa-1} \cdot g \cdot \rho_T \cdot P_T \cdot \left\{ \left( \frac{P_a}{P_T} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left( \frac{P_a}{P_T} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.10})$$

断熱材中のガスの圧力、密度及び速度については、時間  $t$  がゼロの時に (A.11) 式に示すような一定値の初期条件を与えており、時間が経過すると (A.12) 式のように位置と時間の関数となる。

$$t = 0 : P = P_0, \quad \rho = \rho_0, \quad u = 0 \quad (\text{A.11})$$

$$t > 0 : P = P(x, t), \quad \rho = \rho(x, t), \quad u = u(x, t) \quad (\text{A.12})$$

以上の関係式に示す初期値及び境界条件を与えることにより、断熱材中各部の状態量の変化は、連続の式及び運動量の式より順次求めることができる。ここでは、連続の式及び運動量の式に差分法を適用し、適当な時間または距離の区分に従い、最適の緩和係数を用いて、繰り返し計算により解を得た。

## A.2 基礎式の無次元化

基礎式を無次元方程式に変換するため、因子を次のように表す。

$$X = \frac{x}{L}, \quad V = \frac{u}{u^*}, \quad \tau = t \cdot \frac{u^*}{L}, \quad M = \frac{\rho}{\rho_0}, \quad P = \frac{P}{P_0},$$

$$Re = \frac{\rho_0 L u^*}{\mu}, \quad Da = \frac{k}{L^2}, \quad E = \frac{P_0}{\rho_0 u^{*2}} \quad (\text{A.13})$$

これらを基礎式 (A.1) 及び (A.2) に代入して整理すると、各々 (A.14), (A.15) 式となる。

$$\frac{\partial M}{\partial \tau} = - \frac{\partial (MV)}{\partial X} \quad (\text{A.14})$$

$$M \frac{\partial M}{\partial \tau} = - MV \frac{\partial V}{\partial X} - E \frac{\partial (M^2)}{\partial X} - \frac{V}{Re Da} \quad (\text{A.15})$$

ここで、

- x : 軸方向長さ
- L : 断熱材長さ
- u : スライドジョイント部での噴出ガス流速
- t : 時間
- $\rho$  : ガス密度
- $\rho_0$  : 初期密度
- P : ガス圧力
- $P_0$  : 初期圧力
- $\mu$  : 粘性係数
- $Re$  : レイノルズ数
- $Da$  : ダルシー数
- k : 断熱材透過率

## A.3 解析結果と試験結果の比較

本減圧特性解析結果の一例を Fig. A.1 に示す。これは、窒素ガス雰囲気中においてスライドジョイント部開口面積  $325 \text{ mm}^2$ 、減圧速度  $1.95 \text{ MPa/s}$  の場合の結果であり、試験 No. 967 に相当する。主流圧力の減圧曲線 (Pa) は試験により得られたデータを多項式近似で表し、断熱材中のダルシー数は  $5.0 \times 10^{-11}$  を用いた。極値を持つ 2 本の曲線がライナー管に発生する差圧を示し、差圧の大きい方の曲線 ( $P(1) - Pa$ ) は、断熱材中でスライドジョイント部より最も離れた位置と主流との差圧を、差圧の小さい方の曲線 ( $P(51) - Pa$ ) は、スライドジョイント部に最も近い位置と主流との差圧を示す。この時  $P(1) - Pa$  と  $P(51) - Pa$  の最大は、減圧開始後約 3 秒で起こり、その値は、各々  $1.8 \text{ MPa}$ 、 $1.3 \text{ MPa}$  であった。試験 No. 967 の試験結果を Fig. A.2 に示す。 $P(1) - Pa$  に対応する計測点位置 P005 の最大値は  $1.8 \text{ MPa}$ 、 $P(51) - Pa$  に対応する計測点位置 P002 の最大値は  $1.6 \text{ MPa}$  であり、解析結果とほぼ一致していることが

分かる。ただ、断熱材中の圧力差は、解析結果の方が幾分大きくなっており、これは、本試験に使用した断熱材に比べてダルシー数を幾分小さく設定したためと考えられる。

本減圧特性解析に使用した代表値を下記に、また、本解析プログラムを次頁以降に示す。

$$\begin{array}{ll} D_a = 5.0 \times 10^{-11}, & L = 1.82 \text{ m} \\ A_1 = 1.25 \times 10^{-3} \text{ m}^2, & A = 1.99 \times 10^{-1} \text{ m}^2 \\ \mu = 18.02 \text{ } \mu\text{Pa} \cdot \text{s} & P_0 = 4.0 \text{ MPa} \\ \rho_0 = 45.089 \text{ kg/m}^3 & \end{array}$$

## 減圧特性解析プログラム

```

10 ! Depressurization Test Calculation Program
20 ! Control Volume Method & Up-wind Scheme
30 ! Program Name "DPTEST23"
40 ! Test Number "No.980"
50 ! Data Name "TEST3"
60 !
70 OPTION BASE 1
80 !
90 ! Set of Initial Conditions
100 DATA 5.00E-11,1.0,4.77E-4,18.02E-6,4.08062E+5,1.E+4,45.089,1.82,5.
110 RESTORE 100
120 READ Da,Ind,Ar,Mu,Prso,Prsol,Roo,R2,Tauo
130 Nb=50 ! Bunkatu Suu
140 Dtau=1.0E-5 ! Time Step
150 Dx=R2/Nb ! Length Interval
160 Kanwa=.5 !
170 Tau=0.
180 Kap=1.4
190 G=9.80665
200 !
210 ALLOCATE REAL Ro(Nb+1),Roi(Nb+1),Vi(Nb+2),V(Nb+1),P(Nb+1)
220 REAL Kap,Mu,Kanwa,Ind
230 INTEGER Fno
240 !
250 FOR I=1 TO Nb+1
260 Roi(I)=1.0
270 Ro(I)=1.0
280 Vi(I)=0.
290 V(I)=0.
300 P(I)=1.0
310 NEXT I
320 P1pre=P(1)*Prso/1.E+4
330 P51pre=P(Nb+1)*Prso/1.E+4
340 Prs2pre=Prso/1.E+4
350 Taupre=0.
360 G51pre=0.
370 !
380 ! Create Data File
390 Y$="Y"
400 INPUT "Calculation Data Save ? ; Input Y(Yes) or N(No) !",Y$
410 IF Y$="N" THEN GOTO 510
420 INPUT "Input File Name !",File$
430 MASS STORAGE IS ":CS80,1400,1"
440 CREATE BDAT File$&"_1",1,100
450 ASSIGN @Disk TO File$&"_1"
460 OUTPUT @Disk,1;Da,Ar,Prso,Prsol,Nb,Dx,Kap,R2
470 ASSIGN @Disk TO *
480 CREATE BDAT File$&"_2",500,1000
490 MASS STORAGE IS ":CS80,1400,0"
500 !
510 Uo=Ar*SQRT((2./(Kap+1.))^(Kap+1.)/(Kap-1.))*Kap*G*Prso/Roo ! Related D
ata Calculation Uo
520 E=Prso*G/Roo/Uo^2
530 Re=Uo*R2*Roo/Mu/G
540 Crp=(2./(Kap+1.))^(Kap/(Kap-1))
550 !
560 ! Graphics
570 GINIT
580 GRAPHICS ON

```

```

590  GCLEAR
600  !
610  X1=0
620  Xh=30
630  Xs=5
640  Y1=0
650  Yh=60
660  Ys=10
670  F1=-.2
680  Fh=1.8
690  Fs=.2
700  Xu=(Xh-X1)/10
710  Yu=(Yh-Y1)/10
720  VIEWPORT 25,110,25,95
730  PEN 1
740  FRAME
750  WINDOW X1,Xh,F1,Fh
760  AXES 5,Fs,Xh,Fh
770  CLIP OFF
780  CSIZE 4.0,.5
790  LORG 2
800  FOR J=F1*10 TO Fh*10 STEP Fs*10
810     MOVE Xh,J/10
820     LABEL J/10
830  NEXT J
840  DEG
850  LDIR 90
860  LORG 6
870  CSIZE 5.0,.5
880  MOVE Xh+Xu,(F1+Fh)/2
890  LABEL "Flow Rate"
900  LDIR 0
910  !
920  VIEWPORT 25,110,25,95
930  !FRAME
940  WINDOW X1,Xh,Y1,Yh
950  AXES 5,5,X1,Y1
960  !AXES 5,5,Xh,Yh
970  CLIP OFF
980  !
990  CSIZE 4.0,.5
1000 LORG 6
1010 FOR J=X1 TO Xh STEP Xs
1020     MOVE J,Y1-Yu/8
1030     LABEL J
1040 NEXT J
1050 LORG 8
1060 FOR J=Y1 TO Yh STEP Ys
1070     MOVE 0,J
1080     LABEL J
1090 NEXT J
1100 CSIZE 5.0,.5
1110 LORG 6
1120 MOVE (X1+Xh)/2,Y1-Yu
1130 LABEL "Time (Sec)"
1140 DEG
1150 LDIR 90
1160 MOVE X1-Xu*1.5,(Y1+Yh)/2
1170 LABEL "Pressure (kg/cm2)"
1180 LDIR 0
1190 LORG 2
1200 CSIZE 3.0,.5
1210 MOVE X1+Xu/2,Yh-Yu/2
1220 PEN 2
1230 DRAW X1+1.5*Xu,Yh-Yu/2
1240 PEN 1

```

```

1250 MOVE Xl+1.6*Xu,Yh-Yu/2
1260 LABEL "Press. Differ. P(1)-Pa"
1270 MOVE Xl+Xu/2,Yh-Yu
1280 PEN 3
1290 DRAW Xl+1.5*Xu,Yh-Yu
1300 PEN 1
1310 MOVE Xl+1.6*Xu,Yh-Yu
1320 LABEL "Press. P(51)"
1330 PEN 5
1340 MOVE Xl+Xu/2,Yh-1.5*Yu
1350 DRAW Xl+1.5*Xu,Yh-1.5*Yu
1360 PEN 1
1370 MOVE Xl+1.6*Xu,Yh-1.5*Yu
1380 LABEL "Press. Pa"
1390 PEN 7
1400 MOVE Xl+Xu/2,Yh-2.0*Yu
1410 DRAW Xl+1.5*Xu,Yh-2.0*Yu
1420 PEN 1
1430 MOVE Xl+1.6*Xu,Yh-2.0*Yu
1440 LABEL "Press. P(1)"
1450 !
1460 ! Time Step
1470 K=1
1480 G51=1.
1490 Tau=0.
1500 Tau=Tau+Dtau
1510 Tim=R2/Uo*Tau
1520 GOTO 1570
1530 IF Tim>Tauo THEN GOTO 1560
1540 Prs2=Prso*(1-(R2*Tau)/(Tauo*Uo))+(R2*Tau)/(Tauo*Uo)*Prs1
1550 GOTO 1660
1560 Prs2=Prs1
1570 ! Main Pressure Condition
1580 IF Tau<=1.0 THEN Prs2=(3.9990-.093229*Tau-.57122*Tau^2-.055003*Tau^3-.1457
0*Tau^4)/.098*1.E+4
1590 IF Tau>1.0 AND Tau<=2.3 THEN Prs2=(5.6698-2.0720*Tau-1.2430*Tau^2+.93937*T
au^3-.160387*Tau^4)/.098*1.E+4
1600 IF Tau>2.3 AND Tau<=7.90 THEN Prs2=(4.5446-2.4562*Tau+.57535*Tau^2-.060343
*Tau^3+.0023325*Tau^4)/.098*1.E+4
1605 IF Tau>7.9 THEN Prs2=(.9909-.10856*Tau+.0039775*Tau^2)/.098*1.E+4
1610 IF Prs2>Prso THEN Prs2=Prso
1620 IF Prs2<Prs1 THEN Prs2=Prs1
1630 !
1640 !PRINT K;Prs2/Prso;P(51)
1650 ! Iterative Calculation in One Time Step
1660 J=0
1670 J=J+1
1680 IF J<=100 THEN GOTO 1710
1690 PRINT "Line 1420 Stop"
1700 STOP
1710 Dmax=0.
1720 Dif0=0.
1730 !
1740 A=1.+5*(Kap-1.)*(2./(Kap+1.))^((Kap+1.)/(Kap-1.))*Ar^2*Ro(Nb+1)*V(Nb+1)^2
/P(Nb+1)
1750 Pt=P(Nb+1)*A^(Kap/(Kap-1.)) ! Total Pressure
1760 Rot=Ro(Nb+1)*A^(1./(Kap-1.)) ! Total Density
1770 Prat=Prs2/Prso/Pt
1780 IF J=1 THEN GOTO 1800
1790 G51d=G51
1800 IF Prat>Crp THEN GOTO 1840
1810 G51=SQRT(Pt*Rot)
1820 Ri=1
1830 GOTO 1890
1840 !Ab=ABS(2./(Kap-1.)*(5*(Kap+1.))^((Kap+1.)/(Kap-1.))*(Prat^(2./Kap)-Prat^(
(Kap+1.)/Kap))*Pt*Rot)

```



```

1850 Ab=2./(Kap-1.)*( .5*(Kap+1.) )^((Kap+1.)/(Kap-1.))*(Prat^(2./Kap)-Prat^((Kap
+1.)/Kap))*Pt*Rot
1860 IF Ab<=0 THEN Ab=Abm/4
1870 G51=SQRT(Ab)
1880 Ri=0
1890 IF J=0 THEN GOTO 1910
1900 Dif0=ABS(G51-G51d)
1910 Ro(Nb+1)=Roi(Nb+1)-Dtau/Dx*(G51-Ro(Nb)*V(Nb))
1920 !Ro(Nb+1)=(1.-Kanwa)*Ro(Nb+1)+Kanwa*((Roi(Nb+1)/Dtau+(V(Nb+1)+V(Nb+2))*Ro(N
b)/2/Dx)/(1./Dtau+(V(Nb+2)-V(Nb+1))/Dx+(V(Nb+1)+V(Nb+2))/2/Dx))
1930 V(Nb+1)=G51/Ro(Nb+1)
1940 P(Nb+1)=Ro(Nb+1)^Ind
1950 !
1960 FOR I=2 TO Nb
1970   Rod=Ro(Nb+2-I)
1980   Vd=V(Nb+2-I)
1990   IF I=2 THEN GOTO 2070
2000   IF I=Nb THEN GOTO 2150
2010   Ro(Nb+2-I)=(1.-Kanwa)*Ro(Nb+2-I)+Kanwa*(Roi(Nb+2-I)-Dtau/8./Dx*(V(Nb+4-I
)*Ro(Nb+4-I)+2.*V(Nb+3-I)*Ro(Nb+3-I)-2.*V(Nb+1-I)*Ro(Nb+1-I)-V(Nb-I)*Ro(Nb-I)))
2020   Aa=Ro(Nb+2-I)*Vi(Nb+2-I)-Dtau/8./Dx*E*(Ro(Nb+4-I)^Ind+2.*Ro(Nb+3-I)^Ind-
2.*Ro(Nb+1-I)^Ind-Ro(Nb-I)^Ind)
2030   Bb=Ro(Nb+2-I)+Dtau/8./Dx*Ro(Nb+2-I)*(V(Nb+4-I)+2.*V(Nb+3-I)-2.*V(Nb+1-I)
-V(Nb-I))+Dtau/Re/Da
2040   V(Nb+2-I)=(1.-Kanwa)*V(Nb+2-I)+Kanwa*Aa/Bb
2050   GOTO 2220
2060   !
2070   Cc=Roi(Nb)-Dtau/6./Dx*(2.*V(Nb+1)*Ro(Nb+1)-2.*V(Nb-1)*Ro(Nb-1)-V(Nb-2)*R
o(Nb-2))
2080   Dd=1.+Dtau/6./Dx*V(Nb)
2090   Ro(Nb)=(1.-Kanwa)*Ro(Nb)+Kanwa*Cc/Dd
2100   Aa=Ro(Nb)*Vi(Nb)-Dtau/6./Dx*E*(2.*Ro(Nb+1)^Ind+Ro(Nb)^Ind-2.*Ro(Nb-1)^In
d-Ro(Nb-2)^Ind)
2110   Bb=Ro(Nb)+Dtau/6./Dx*Ro(Nb)*(2.*V(Nb+1)+V(Nb)-2.*V(Nb-1)-V(Nb-2))+Dtau/R
e/Da
2120   V(Nb)=(1.-Kanwa)*V(Nb)+Kanwa*Aa/Bb
2130   GOTO 2220
2140   !
2150   Cc=Roi(2)-Dtau/6./Dx*(V(4)*Ro(4)+2.*V(3)*Ro(3)-2.*V(1)*Ro(1))
2160   Dd=1.-Dtau/6./Dx*V(2)
2170   Ro(2)=(1.-Kanwa)*Ro(2)+Kanwa*Cc/Dd
2180   Aa=Ro(2)*Vi(2)-Dtau/6./Dx*E*(Ro(4)^Ind+2.*Ro(3)^Ind-Ro(2)^Ind-2.*Ro(1)^I
nd)
2190   Bb=Ro(2)+Dtau/6./Dx*Ro(2)*(V(4)+2.*V(3)-V(2)-2.*V(1))+Dtau/Re/Da
2200   V(2)=(1.-Kanwa)*V(2)+Kanwa*Aa/Bb
2210   !
2220   Dif1=ABS(Ro(Nb+2-I)-Rod)
2230   Dif2=ABS(Vd-V(Nb+2-I))
2240   Dmax=MAX(Dif0,Dif1,Dif2,Dmax)
2250   !PRINT I,Ro(Nb+1-I),V(Nb+2-I)
2260   !PRINT Dif0,Dif1,Dif2,Dmax
2270 NEXT I
2280 Abm=Ab
2290 !
2300 IF Dmax>.001 THEN GOTO 1670
2310 FOR I=1 TO Nb
2320   P(Nb+2-I)=Ro(Nb+2-I)^Ind
2330 NEXT I
2340 Ro(1)=(Roi(1)-Dtau/4./Dx*(Ro(3)*V(3)+2.*Ro(2)*V(2)))/(1.-3.*Dtau/4./Dx*V(1
))
2350 V(1)=(Ro(1)*Vi(1)-Dtau/4./Dx*E*(Ro(3)^Ind+2.*Ro(2)^Ind-3.*Ro(1)^Ind))/(Ro(
1)+Dtau/4./Dx*Ro(1)*(V(3)+2.*V(2)-3.*V(1))+Dtau/Re/Da)
2360 P(1)=Ro(1)^Ind
2370 ! End of Execution of Calculation
2380 !
2390 FOR I=1 TO Nb+1

```

```

2400     IF V(I)>=0. THEN GOTO 2420
2410     V(I)=0.
2420     NEXT I
2430     IF K>1 THEN GOTO 2450
2440     !PRINT Uo,E,Re,Crp
2450     IF K<=100 THEN GOTO 2520
2460     F=K/250.
2470     FOR N=1 TO 200
2480         L=N
2490         IF F=L THEN GOTO 2570
2500     NEXT N
2510     GOTO 2580
2520     F=K/5.
2530     FOR N=1 TO 20
2540         L=N
2550         IF F=L THEN GOTO 2570
2560     NEXT N
2570     !
2580     FOR I=1 TO 51
2590         Roi(I)=Ro(I)
2600         Vi(I)=V(I)
2610     NEXT I
2620     DISP K,"TIME=";Tau;P(Nb+1);P(1);P(2)
2630     IF FRACT(K/200)<>0 THEN GOTO 3170
2640     !
2650     ! Calculation Data Record
2660     IF Y$="N" THEN GOTO 2740
2670     MASS STORAGE IS ":CS80,1400,1"
2680     Fno=K/200
2690     ASSIGN @Disk TO File$&"_2"
2700     OUTPUT @Disk,Fno;Tau;Prs2;Pt;G51;Ri;P(*);V(*)
2710     ASSIGN @Disk TO *
2720     MASS STORAGE IS ":CS80,1400,0"
2730     !
2740     IMAGE 3(DD,X,D.DDDDDD,3X)
2750     GOTO 2850
2760     PRINT " "
2770     PRINT K;Prs2/Prso;G51
2780     FOR I=1 TO (Nb+1)/3
2790         I1=3*(I-1)+1
2800         I2=3*(I-1)+2
2810         I3=3*(I-1)+3
2820         PRINT USING 2740;I1,P(I1),I2,P(I2),I3,P(I3)
2830     NEXT I
2840     !
2850     ! Graphics
2860     P1now=P(1)*Prso/1.E+4
2870     P51now=P(Nb+1)*Prso/1.E+4
2880     Prs2now=Prs2/1.E+4
2890     Taunow=Tau
2900     G51now=G51
2910     IF Ri=0 THEN PEN 2
2920     IF Ri=1 THEN PEN 1
2930     MOVE Taupre,P1pre-Prs2pre
2940     DRAW Taunow,P1now-Prs2now
2950     PEN 6
2960     MOVE Taupre,P51pre-Prs2pre
2970     DRAW Taunow,P51now-Prs2now
2980     PEN 3
2990     MOVE Taupre,P51pre
3000     DRAW Taunow,P51now
3010     PEN 5
3020     MOVE Taupre,Prs2pre
3030     DRAW Taunow,Prs2now
3040     PEN 7
3050     MOVE Taupre,P1pre

```

```
3060 DRAW Taunow,P1now
3070 PEN 4
3080 MOVE Taupre,(G51pre-F1)/(Fh-F1)*Yh
3090 DRAW Taunow,(G51now-F1)/(Fh-F1)*Yh
3100 PEN 1
3110 P1pre=P1now
3120 P51pre=P51now
3130 Prs2pre=Prs2now
3140 Taupre=Taunow
3150 G51pre=G51now
3160 !
3170 Seig=P(1)-1.*Prs2/Prso
3180 K=K+1
3190 IF Seig>0. THEN GOTO 3220
3200 PRINT "Line 2530 Stop"
3210 STOP
3220 IF K<800000 THEN GOTO 3250
3230 PRINT "Line 2560 Stop"
3240 STOP
3250 IF K>=401 AND K<1201 THEN GOTO 3330
3260 IF K>=1201 AND K<2801 THEN GOTO 3370
3270 IF K>=2801 AND K<5801 THEN GOTO 3410
3280 IF K>=5801 AND K<13801 THEN GOTO 3450
3290 IF K>=13801 AND K<19801 THEN GOTO 3490
3300 IF K>=19801 THEN GOTO 3530
3310 GOTO 1500
3320 !
3330 Dtau=.00002
3340 Kanwa=.5
3350 GOTO 1500
3360 !
3370 Dtau=.00005
3380 Kanwa=.5
3390 GOTO 1500
3400 !
3410 Dtau=.0001
3420 Kanwa=.4
3430 GOTO 1500
3440 !
3450 Dtau=.0002
3460 Kanwa=.2
3470 GOTO 1500
3480 !
3490 Dtau=.0005
3500 Kanwa=.2
3510 GOTO 1500
3520 !
3530 Dtau=.001
3540 Kanwa=.2
3550 GOTO 1500
3560 !
3570 END
3580 SUB Scale
3590 SUBEND
```

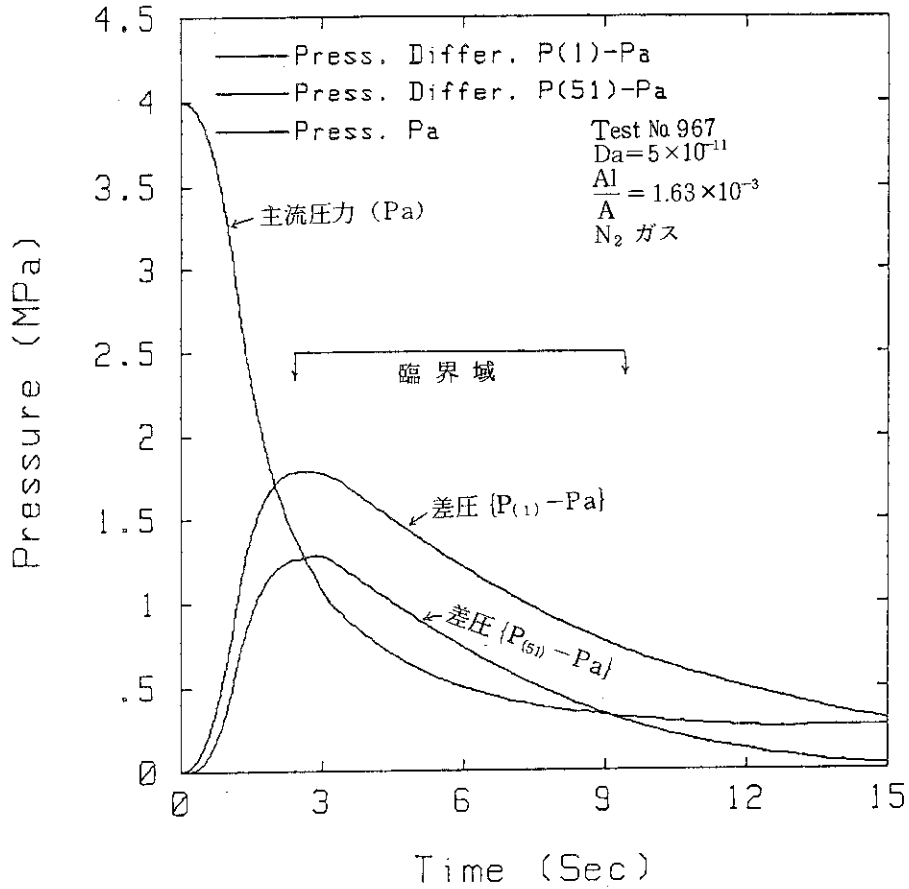


Fig.A.1 解析結果の一例

No. 967

P001 P002 P003 P004 P005 P0 = 4.01

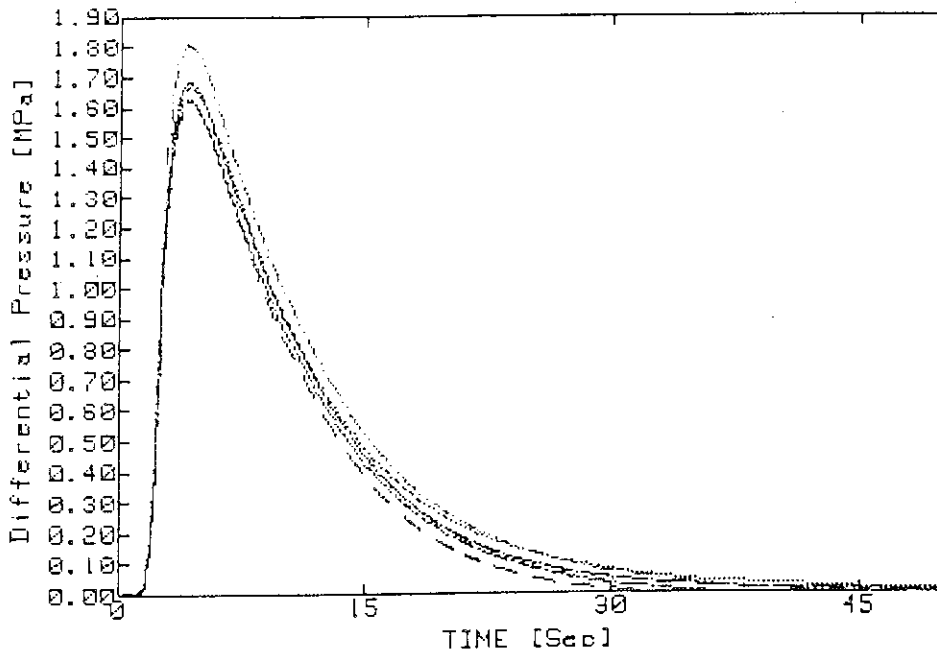


Fig.A.2 Fig.A.1 と同一条件による試験結果 (窒素ガス, No 967)